

ETALONIRANJE PIRANOMETARA

Predrag Kolarž, Aleksandra Nenadić, Bojan Turundžilović

Ključne reči: etaloniranje, piranometar, sunčevo zračenje.

KRATAK SADRŽAJ

Piranometri su meteorološki instrumenti koji mere globalnu ozračenost, tj. količinu sunčeve energije po jedinici površine u jedinici vremena koja pada na horizontalnu površinu iz hemisfernog vidnog polja (2π sr) u spektralnom opsegu od 0,3 do 3,0 μm . Piranometri najčešće imaju termoelektrične senzore koji pretvaraju energiju zračenja u toplotnu energiju koja se preko serije termoelemenata na prijemnoj površini potom pretvara u električnu energiju. Etaloniranje piranometra se sastoji u određivanju veze između njegovog izlaznog signala i zračenja pod definisanim radnim uslovima i sa pridruženom mernom nesigurnošću. Etaloniranje se vrši pomoću pirheliometra u prirodnim uslovima (spoljašnjoj sredini) ili poređenjem sa referentnim piranometrom (standard ISO 9847) u veštačkim (laboratorijskim) uslovima. Laboratorijsko etaloniranje zahteva da merilo i referentni piranometar budu istoga tipa i isti model ili da imaju isti broj termoelemenata u prijemnom delu. Meteorološka laboratorija Republičkog hidrometeorološkog zavoda (RHMZ) poseduje tri referentna aktinometra (piranometra) proizvođača Kipp & Zonen: CMP6, CMP10 i SP Lite2 koji su ujedno i najčešće korišćeni na meteorološkim stanicama, kao i referentni pirheliometar CHP1 istog proizvođača. Metoda etaloniranja se zasniva na poređenju dva radiometra, referentnog piranometra (etalona) i merila, koji se nalaze jedan pored drugoga na rotirajućem postolju pod stabilnim veštačkim suncem. Za izvor veštačkog sunca se koristi metal halogena lampa (Philips MasterColor CDM-T 150W) sa naponskom stabilizacijom. Reflektor se nalazi 1 m iznad radiometara proizvodeći vertikalni snop svetlosti. Snaga ozračivanja koja stiže do radiometara je oko 500 Wm^{-2} . Etaloniranje se vrši tako što se referentni piranometar i merilo naizmenično osvetljavaju i zamaćuju pri tom menjajući položaj pomoću rotirajućeg postolja.

CALIBRATION OF PYRANOMETERS

Keywords: calibration, pyranometer, solar radiation

ABSTRACT

Pyranometers measure global irradiance: the amount of solar energy per unit area per unit time incident on a horizontal surface emanating from a hemispherical field of view (2π sr) in spectral range from 0,3 to 3,0 μm . Most often pyranometers have thermoelectric sensors that convert radiant into thermal energy, which is then converted into electrical energy via a series of thermoelements on the receiving surface. Calibration of a pyranometer consists in determining the relationship between its output signal and

radiation under defined operating conditions and with the associated measurement uncertainty. Calibration is performed using a pyrliometer in the outdoor environment or by comparison with a reference pyranometer (standard ISO 9847) in laboratory conditions with a pyranometer. Indoor calibration is done by comparison of the test pyranometer to a reference pyranometer of the same model, and thus of the same class. The metrological laboratory of RHMZ has three reference actinometers manufactured by Kipp & Zonen: CMP6, CMP10 and SPLite 2, which are also the most commonly used in meteorological stations. The calibration method is based on the comparison of two radiometers, a reference standard and a test pyranometer, which are located next to each other under stable artificial sunlight. A metal halogen lamp (Philips MasterColor CDM-T 150W) with voltage stabilization is used as a source of artificial sunlight. The reflector is located 1 m above the radiometer producing a vertical beam of light. The radiation power reaching the radiometer is about 500 Wm^{-2} . Calibration is performed by alternately illuminating and darkening the reference and the test pyranometer while changing the position using a rotating stand.

UVOD

Sunčevo zračenje predstavlja celokupni spektar elektromagnetnog zračenja koje na površinu Zemlje dolazi sa Sunca. Sunčeva konstanta predstavlja količinu energije koja dolazi od Sunca i pada na gornju površinu Zemljine atmosfere u jedinici vremena normalno na jediničnu površinu, pri srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca i iznosi $1367,7 \text{ Wm}^{-2} \pm 6 \text{ Wm}^{-2}$. Raspodelu sunčevog zračenja na gornjoj površini atmosfere određuju astronomski faktori: rotacija Zemlje oko Sunca, nagib ose Zemljine rotacije prema ekliptici i dnevna rotacija Zemlje. Ukupno sunčevo zračenje na površini zemlje je jednako zbiru direktnog i difuznog zračenja. U pojedinim slučajevima u sumu zračenja može ulaziti i reflektovano zračenje (albedo) kao i dugotalasno zračenje sa površine zemlje.

Piranometri



Slika 1. Piranometar

Piranometri (Slika 1.) su meteopološki instrumenti koji mere globalnu ozračenost površine zemlje, tj. količinu sunčeve energije po jedinici površine u jedinici vremena koja pada na horizontalnu površinu (senzor) iz hemisfernog vidnog polja ($2\pi \text{ sr}$) u opsegu talasnih dužina od $0,3 \mu\text{m}$ do $3 \mu\text{m}$. Oni mogu imati termoelektrične ili fotodiodne senzore. Termoelektrični senzori pretvaraju energiju zračenja u toplotnu energiju koja se potom pretvara u električnu energiju. Prijemna površina se sastoji iz više termo-elemenata koji su spojeni u seriju i presvučeni mat crnim premazom. Termo-element, tj. prijemna površina piranometra je zaštićena od spoljnih uslova (vetra, kiše i prašine kao i razmene toplotnog zračenja sa okolinom) pomoću jedne ili dve transparentne kupole ili difuzora čija spektralna transmisivnost ograničava spektralni opseg odziva na opseg od $0,3 \mu\text{m}$ do $3 \mu\text{m}$. Staklena kupola, tj. difuzor omogućavaju prijem zračenja iz prostornog ugla od $2\pi \text{ sr}$.

ETALONIRANJE PIRANOMETARA

Etaloniranje piranometra se sastoji u određivanju veze između njegovog izlaznog signala i zračenja pod definisanim radnim uslovima i sa pridruženom mernom nesigurnošću. Rezultat se najčešće izražava kao „osetljivost“ koja zapravo predstavlja konstantu. Kada se naponski signal piranometra podeli sa osetljivošću dobija se globalno sunčevo ozračivanje horizontalne površine koje se izražava u Wm^{-2} . Etaloniranje piranometara se može vršiti u prirodnim uslovima (spoljašnjoj sredini) gde se kao izvor zračenja koristi sunčevo zračenje ili u veštačkim (laboratorijskim) uslovima gde se kao izvor zračenja koristi „veštačko sunce“ tj. lampa sa približnim sunčevim spektrom. Za razliku od etaloniranja u spoljašnjoj sredini, za etaloniranje u laboratoriji je neophodno da etalonski piranometar i merilo budu istoga tipa i isti model, tj. da imaju isti broj termo-elemenata u prijemnoj površini, kao i da su i iste klase. Zato je za laboratorijska etaloniranja potrebno posedovati više tipova referentnih etalona.

Etaloniranje se vrši pomoću pirheliometra ili referentnog piranometra prema standardu ISO 9846 [1] u spoljašnjoj sredini ili prema standardu ISO 9847 [2] u laboratorijskim uslovima poređenjem sa referentnim piranometrom. Oba dokumenta opisuju kako se vrši transfer „osetljivosti“ sa referentnog instrumenta na merilo.

Veza između koeficijenta osetljivosti piranometra, izlaznog signala i snage sunčevog zračenja je data jednačinom za termoelektrične piranometre pomoću:

$$S = (V - V_0) / G \quad (1)$$

gde je:

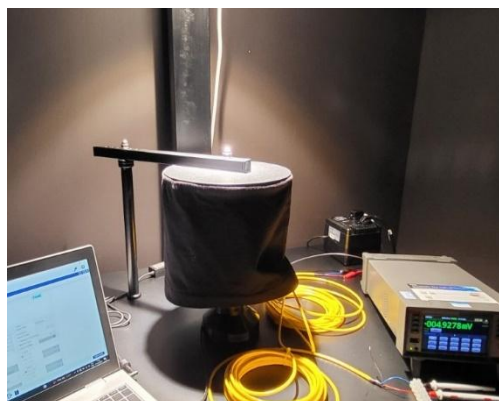
S - koeficijent osetljivosti u $\mu\text{VW}^{-1}\text{m}^{-2}$;

G - globalno sunčevo ozračivanje horizontalne površine Wm^{-2} ;

V - izlazni signal piranometra u proizvoljnim jedinicama;
 V_0 - ofset izlaznog signala piranometra u proizvoljnim jedinicama.



Slika 2. Sto za etaloniranje.



Slika 3. Postupak etaloniranja sa i bez zastora.

Laboratorijsko etaloniranje merila se vrši korišćenjem veštačkog sunca, tj. lampe čiji je emisijski spektar drugačiji od sunčevog spektra i sa relativno niskim nivoom zračenja. Za razliku od merila, referentni piranometar se etalonira u spoljašnjim uslovima u odnosu na Sunce po standardu ISO 9846. Pošto su merilo i referentni piranometar istog modela, oba instrumenta će reagovati na isti način kada nivo zračenja, greška nagiba i spektar odstupe od uslova tokom etaloniranja na otvorenom (tj. linearnost i spektralni odziv oba instrumenta su identični, pa će se ovi efekti poništiti). Na ovaj način, novoetalonirano merilo će dobiti osetljivost koja važi pod istim spoljnim referentnim uslovima zračenja, nagiba i spektra pod kojima je referentni piranometar etaloniran. Etaloniranje u zatvorenom samo dovodi do malog povećanja merne nesigurnosti etaloniranja, ali ne menja referentne uslove etaloniranja.

Kao izvor veštačkog sunca se koristi metal halogena lamp (Philips Master Color CDM-T 150W/942 G12 T6 1CT, Cool White, 4200 K) sa naponskom stabilizacijom. Reflektor se nalazi 100 cm iznad radiometara proizvodeći vertikalni snop svetlosti (Slika 2). Snaga ozračivanja koja stiže do radiometara je preko 500 Wm^{-2} . Metoda etaloniranja se zasniva na poređenju dva radiometra, referentnog piranometra (etalona) i merila, koji se nalaze jedan pored drugog, naizmenično osvetljeni stabilnim izvorom tj. „veštačkim suncem“ i zaklanjani u potpuni mrak mehanizmom za zamračivanje (Slika 3).

Da bi se što više smanjilo rasipanje svetla od zidova i rukovaoca etaloniranja, svetlost je svedena na mali konus oko radiometara. Referentni piranometar i merilo su smešteni jedan pored drugoga na postolju. Postolje može da se rotira tako da se pozicije referentnog piranometra i merila zamene. Lampa je centrirana na osu rotacije postolja tako da osvetljava oba radiometra podjednako (Slika 3). Upadni ugao svetlosti lampe zapravo nije upravan, ali je isti za oba radiometra (oko 3°) tako da ne može povećavati mernu

nesigurnost. Efekat malog odsupanja svetlosti od vertikale je zanemarljiv. Kada se ceo sistem namesti, samo etaloniranje dosta kratko traje i jednostavno je, ali se procedura mora sprovesti pažljivo i temeljno.

Procedura etaloniranja

Etaloniranje piranometara se vrši tako što se referentni piranometar i merilo postavljaju jedan pored drugog na rotirajuće postolje u položaj 1, dok ih osvetljava lampa intenzitetom od približno 500 Wm^{-2} [3]. Posle jednog minuta osvetljavanja mere se izlazni signal oba piranometra pomoću multimetra. Sa oznakom "R" se obeležava izlazni signal referentnog piranometra, a sa oznakom "T" se obeležava izlazni signal merila. Zatim se mehanizmom za zamračivanje zaklanjaju oba piranometra tako da do njih ne dopire nikakva svetlost. Posle jednog minuta se očitavaju izlazni signali oba piranometra. Dobijene vrednosti se zovu „nulti ofset“ (struja mraka) i obeležavaju se "RE" i "TE" (2,3). Red veličine ovog signala je nekoliko Wm^{-2} ukoliko je proizvođač piranometara Kipp & Zonen, kod ostalih proizvođača ovaj signal može biti i veći. Nulti ofset se kasnije oduzima od očitanih vrednosti R i T. Rezultujuće vrednosti su:

$$R_1 (=R-RE) \quad (2)$$

$$T_1 (=T-TE) \quad (3)$$

Verovatnoća nastanka greške merenja zbog nehomogenog osvetljenja uvek postoji. Zato se pozicije piranometara zamenjuju okretanjem rotirajućeg postolja za 180° . Potom se cela procedura ponavlja. Rezultujuća vrednost drugog merenja se obeležava sa R_2 i T_2 (4). Zatim se osetljivost "ST" merila izračunava preko poznate „osetljivosti“ referentnog piranometra "SR".

$$ST = SR \cdot \frac{(T_1+T_2)}{(R_1+R_2)} \quad (4)$$

Konačno, provera merne nesigurnosti i stabilnosti lampe se vrše pomoću izlaznih signala piranometara (5). Ukoliko stabilnost nije u okviru granica, etaloniranje se odbacuje. Pravilo je da etaloniranje nije uspelo ako su vrednosti sledećih izraza van granica:

$$0.98 < \frac{(R_1 \cdot T_1)}{(R_2 \cdot T_2)} < 1.02 \quad (5)$$

$$0.98=(1-K), 1.02=(1+K), K \text{ мора бити } \leq 0.01$$

Ovaj izraz zavisi od:

- Grešake očitavanja rukovaoca etaloniranjem,
- Slučajnog zaklanjanja nekog od piranometara,
- Pogrešne pozicije pri rotaciji postolja,
- Nestabilnosti osvetljenja.

Drift lampe utiče na rezultate izraza iako je efekat na osetljivosti "ST" zanemarljiv zbog skoro simultanog očitavanja izlaznih vrednosti zračenja.

Merna nesigurnost etaloniranja piranometara

Kombinovana merna nesigurnost rezultata etaloniranja "U" se prikazuje kao pozitivan koren sume kvadrata pojedinačnih mernih nesigurnosti (6):

- a) merne nesigurnosti osetljivosti referentnog piranometra "US",
- b) merne nesigurnosti metode "UM",
- c) merne nesigurnosti devijacija uslova etaloniranja "UE" merila i referentnog piranometra

$$U = \sqrt{U_S^2 + U_M^2 + U_E^2} \quad (6)$$

Tipične vrednosti doprinosa a, b i c na proširenu mernu nesigurnost ($k=2$) u okviru laboratorijskog etaloniranja za piranometar klase A su 0,3 %, 0,5 % i 0,75 %, respektivno, što vodi do korena sume kvadrata od 0,95% što je okvirna vrednost merne nesigurnosti etaloniranja piranometara.

ZAKLJUČAK

Imajući u vidu globalne promene u atmosferi usled efekata staklene bašte koje za posledicu imaju promenu intenziteta pojedinih komponenti sunčevog zračenja kao i rastuću potrebu za alternativnim izvorima energije poput solarnih elektrana, kao i mnoge druge potrebe za merenjem intenziteta sunčevog zračenja i njegovih komponenti javlja se potreba za unifikacijom merne opreme, tj. etaloniranjem merila sunčevog zračenja - piranometara. Metoda etaloniranja piranometara, koja se primenjuje u Meteorološkoj laboratoriji RHMZ je nedavno akreditovana od strane Akreditacionog Tela Srbije (ATS) i uspešno se implementira na piranometrima iz Državne mreže automatskih meteoroloških stanica (AMS). Sledeći cilj ove laboratorije je ponovno uspostavljanje Nacionalnog centra za sunčevo zračenje (NCSZ) čime bi zaokružili ovu oblast na nivou Republike Srbije, a kako bi validovali merenja u okviru GOS (Global Observing System – Globalni Osmatračke Mreže). Time bi podaci postali deo WRDC (World Radiation Data Centre – Svetski Centar Podataka Zračenja), kao i mreže programa GAW (Global Atmosphere Watch Programme – Program Globalnog Osmatranja Atmosfere), koje su deo WMO (World Meteorological Organization – Svetske Meteorološke Organizacije).

ZAHVALNOST

Zahvaljujemo se rukovodstvu RHMZ na prihvatanju ideje da se kupi neophodna oprema i razvije metoda za etaloniranje piranometara u laboratorijskim uslovima, omogućiti obukom i međulaboratorijsko poređenje sa partnerskim laboratorijama DHMZ iz Zagreba, Hrvatska i ARSO iz Ljubljane, Slovenija.

LITERATURA

- [1] ISO 9846:1993, Solar energy — Calibration of a pyranometer using a pyrheliometer;
- [2] ISO 9847:2023 Solar energy - Calibration of pyranometers by comparison to a reference pyranometer, Second edition 2023-01;
- [3] Calibration Facility for Radiometers (CFR, Calibration Facility), Kipp & Zonen, Version: 0107.