primljen: 15.06.2026. *https://doi.org/10.62683/NiP29.6*

Pregledni rad

prihvaćen: 29.06.2026.

EVAPORACIJA SA SLOBODNE VODENE POVRŠINE – NESIGURNOSTI I IZAZOVI

Mladen Milanović[1], Slaviša Trajković[2], Marija Milićević[3]

Rezime: Isparavanje je jedna od najvažnijih komponenti hidrološkog ciklusa i glavni razlog gubitka vode u vodnim telima. Precizno određivanje isparavanja je neophodno za praćenje, istraživanje i upravljanje vodnim resursima. Isparavanje sa slobodne vodene površine je komplikovan nelinearan regresijski proces, koji zavisi od različitih meteoroloških varijabli. Poznavanje procesa merenja isparavanja omogućava dobijanje kvalitetnih podataka za dalju upotrebu, odnosno isparavanje u kombinaciji sa transpiracijom predstavlja proces evapotranspiracije, koji objedinjuje sve meteorološke parametre (vetar, zračenje, vlažnost i temperaturu vazduha) i manifestuje njihov uticaj na potrebe biljaka za vodom.

U radu su predstavljeni instrumenti za merenje isparavanja (evaporimetri) koji su najviše u upotrebi. Poseban cilj rada je da ukaže na osnovne procese koji objašnjavaju fiziku isparavanja kao i na izazove i nesigurnosti u procesu merenja isparavanja.

Ključne reči: isparavanje, evaporimetri, nesigurnost, izazov

EVAPORATION FROM FREE WATER SURFACE – UNCERTAINTY AND CHALLENGES

Abstract: Evaporation is one of the most important components of the water cycle and the main reason for water deficit in water bodies. Accurate evaporation estimation is essential for monitoring, research and management of water bodies. Evaporation from free water surface is a complicated nonlinear regression process, which depends on different meteorological variables. Familiarity with the evaporation measurement process provides higher quality data for further use, i.e. evaporation and transpiration combined constitute the process of evapotranspiration, which combines all meteorological parameters (wind, radiation, humidity and air temperature) and manifests their influence on the crop water requirements.

The paper presents the most commonly used instruments for measuring evaporation – evaporimeters. A special aim of the paper is to show the basic process which explains the physics of evaporation as well as the uncertainty and challenges present during the evaporation measurement process.

Key words: Evaporation, Evaporimeters, Uncertainty, Challenge

1 Dr, docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Srbija, mmsmladen@gmail.com, 0000-0002-7093-3653
2 Dr, redovni profesor, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Srbija, slavisa@gaf.ni.ac.rs, 0000-0001-8294-1047
3 Master, asistent, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Srbija, marija.milicevic@gaf.ni.ac.rs, 0009-0000-8886-2200

1 UVOD

Procena isparavanja je od najveće važnosti u mnogim hidrološkim problemima povezanim sa planiranjem i održivim radom akumulacija i sistema za navodnjavanje. Isparavanje sa površine kopna troši približno 61% ukupnih globalnih padavina [1] i zato je važna komponenta hidrološkog ciklusa. Kroz proces isparavanja uključeni su procesi razmene mase i toplote između kopna i atmosfere, pa samim tim isparavanje direktno utiče i na resurse podzemnih voda i upravljanje vodama. Precizna procena isparavanja posebno je važna sa aspekta izraženih klimatskih promena - povišene temperature i duže i jače suše [2].

Postoji više metoda za procenu isparavanja, zasnovanih na merenju nekoliko meteoroloških varijabli, kao što su metod bilansa vode, metod energetskog bilansa, metod vrtložne korelacije, Penmanov metod. Ove metode nisu pogodne za rutinsku procenu isparavanja, zbog visoke cene, složenosti opreme i postupka [3]. Takođe, postoji i drugačiji pristup kod procene isparavanja, odnosno direktno merenje isparavanja pomoću isparitelja. Isparitelji su uređaji koji imaju široku primenu, jer je ovo jedina metoda koja ne zahteva merenja specifična za konkretnu lokaciju [4].

Evaporimetri zasnovani na merenju isparavanja iz suda predstavljaju verovatno instrument koji se najčešće koristi za procenu isparavanja, uglavnom zvog svoje intuitivnosti i prividne jednostavnosti. Princip rada uređaja svodi se na to da količina vode koja je isparila odgovara smanjenju zapremine vode, odnosno smanjenju u nivou vode tokom dva merenja u određenom periodu. Ovakvi isparitelji odražavaju združene efekte neto radijacije, temperature vazduha i vode, vlažnosti vazduha i brzine vetra, i direktno ih prenose na stanje vode u rezervoaru [5]. Odnosi između isparavanja iz posude i ostalih spoljnih uticaja su nelinearni i prema tome veoma komplikovani [6].

Pojam nesigurnosti kod procene isparavanja uvodi se zbog nesigurnosti podataka i modela. Najveći izvori nesigurnosti podataka su greške koje se javljaju prilikom merenja na isparitelju i kišomeru i samim tim rad sa ovakvim instrumentima predstavlja poseban izazov. Više autora bavili su se problemima vezanim za isparitelje: karakteristike isparitelja i međusobni odnosi [7, 8], merna oprema i zaštita [9 - 12] i uticaj okolne sredine [13, 14].

Rad predstavlja okvir za kvantifikaciju najvećih izvora nesigurnosti i izazova i mogućih rizika u proceni isparavanja, sa ciljem da se proces rada sa evaporimetrima zasnovanim na merenju isparavanja vode iz posude dodatno unapredi i optimizuje.

2 TEORIJA ISPARAVANJA

Isparavanje je fizički proces kojim voda iz tečne faze prelazi u gasovito stanje, odnosno u parnu fazu. Proces pretvaranja vode u vodenu paru zasniva se na snabdevanju energijom (obezbeđuje molekulima vode potrebnu kinetičku energiju za bekstvo sa površine tečnosti) i mehanizmu uklanjanja izbeglih molekula iz neposredne blizine površine tečnosti, sa ciljem sprečavanja njihove kondenzacije [15]. Mehanizam isparavanja koji čine raspoloživa toplotna energija i deficit pritiska pare između površine koja isparava i vazduha iznad nje, zavisi od meteoroloških faktora kao što su temperatura, relativna vlažnost i brzina vetra.

Glavna komponenta koja utiče na proces pretvaranja vode iz tečnog stanja u gasovito je sunčeva energija. Količina energije potrebna za isparavanje naziva se latentna toplota isparavanja [10,16]. Proces se zasniva na tome da sa apsorbovanjem dovoljne količine toplote, molekuli vode dobiju energiju kojom napuštaju površinu isparavanja i odlaze u vazduh kao para. Isparavanjem, vazduh postaje zasićen vodenom parom i proces se konstantno usporava, tako da je u određenom trenutku moguć i prestanak isparavanja. Bitno je naglasiti da latentna toplota nije dovoljan faktor za odvijanje isparavanja, već je za nesmetano isparavanje neophodna i razlika u sadržaju vlage između površine sa koje se vrši isparavanje i atmosfere [5]. Razlika u sadržaju vlage, zamena zasićenog vazduha suvim, postiže se kretanjem vazduha, odnosno zavisi od brzine vetra.

Osnovne metode kojima se objašnjava isparavanje su [11]:

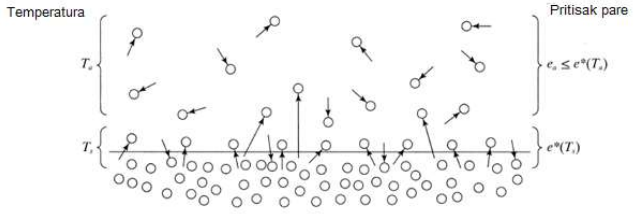
- metod transfera vlage,
- metod energetskog bilansa i
- metod vodnog bilansa.

2.1 METOD TRANSVERA VLAGE (AERODINAMIČKI METOD)

Metod transfera vlage (metod prenosa mase) zasniva se na gradijentu pritiska pare sa površine vode na vazduh i na transport pare vetrom. Uopšteni oblik metode dat je u jednačini [16]:

$$E = k_m u\left(e_s - e_a\right) \quad (1)$$

gde je E isparavanje (mm dan^{-1}), k_m ograničava prenos mase, u je brzina vetra (m s^{-1}), e_s je pritisak zasićene pare (kPa), a e_a je stvarni pritisak zasićene pare (kPa), odnos (e_s - e_a) je mera sposobnosti vazduha da prihvati nove molekule vode. Na slici 1 prikazan je proces isparavanja sa otvorene vodene površine.



Slika 1 – Šematski dijagram fluksa molekula vode preko površine vode [10]

U zavisnosti od temperature površine i temperature i vlažnosti vazduha, razlika između dva napona pare može biti pozitivna, nula ili negativna:

- ako je $e_a > e_s$, dolazi do isparavanja,
- ako je $e_a < e_s$, voda se kondenzuje na površini i
- ako je $e_a = e_s$, ne dolazi ni do kondenzacije ni do isparavanja.

Prema [17], ovaj metod pruža najdirektniji opis mehanizama transporta vodene pare, tako da kad god je moguće, treba da ima prioritet u opisivanju isparavanja.

2.2 METOD ENERGETSKOG BILANSA

Isparavanje je funkcija energetskog stanja vodnog sistema. Isparavanje se može proceniti uzimajući u obzir sve izvore i prenose zračenja, što predstavlja osnovu za energetski bilans, odnosno energija koja stiže na površinu vode mora biti jednaka energiji koja napušta površinu za isti vremenski period. Isparavanje u bilansu toplotne energije (metoda energetskog bilansa) uzima u obzir priliv energije (En_{in}), odliv energije (En_{out}) i promenu u skladištenju energije (ΔEn_s), što predstavlja princip kontinuiteta mase [18]:

$$En_{in} - En_{out} = \Delta En_s \pm e \qquad (2)$$

gde e predstavlja grešku.

Jednačina energetskog bilansa koja proizilazi iz principa kontinuiteta mase glasi [5]:

$$H + \lambda E = R_n - G \qquad (3)$$

gde je R_n neto zračenje (MJ m^{-2} dan^{-1}), λ je latentna toplota isparavanja (MJ kg^{-1}), λE je latentni toplotni fluks (MJ m^{-2} dan^{-1}), H je osetna toplota (MJ m^{-2} dan^{-1}) i G toplotni fluks zemljišta (MJ m^{-2} dan^{-1}). Ovako pojednostavljena jednačina energetskog bilansa koristi se za definisanje strukture modela za procenu brzine isparavanja.

2.3 METOD VODNOG BILANSA

Metod vodnog bilansa u hidrološkom sistemu može se definisati jednačinom [19]:

$$\left(P + Q + Q_r + Q_s\right) - \left(E + Q_0 + Q_d\right) = \frac{dS}{dt} \qquad (4)$$

gde unos vode u vodno telo predstavljaju padavine – P, dotok u vodno telo – Q, površinski doticaj – Q_r i podzemni doticaj – Q_s. Odliv iz vodnog tela čine isparavanje – E, površinski oticaj – Q_o i podzemni oticaj – Q_d i brzina promene skladištenja (priliv-odliv) vode – dS/dt.

Smatra se da metode energetskog i vodnog bilansa generalno nisu praktične zbog neizbežnog prisustva grešaka pri merenju koje mogu da kompromituju krajnji rezultat.

3 INSTRUMENTI ZA MERENJE ISPARAVANJA – EVAPORIMETRI

Evaporimetri su uglavnom posude za isparavanje sa standardizovanim instrumentima, standardizovanih oblika i veličina, koje su napunjene vodom. Merenje isparavanja kod ovakvih uređaja svodi se na redovno praćenje promene dubine vode u sudu. Prema načinu postavljanja suda za isparavanje, razlikuju se površinski, ukopani i plutajući isparitelji [19].

Ukopani isparitelji postavljaju se u zemlju i pune se vodom, pri čemu se nivo vode održava na približno istom nivou kao i tlo. Ukopavanjem posude u zemlju teži se da se smanje nepoželjni granični efekti, kao što su zračenje na bočnim zidovima suda i razmena toplote između atmosfere i same posude. Glavna prednost ovakvog vida postavljanja isparitelja je da su aerodinamičke i radijacione karakteristike u sudu približne karakteristikama okoline.

Održavanje ukopanih evaporimetara je teže jer imaju tendenciju da lakše sakupljaju prljavštinu i otpadke. Poseban problem predstavlja procurivanje suda jer se teško otkriva (dolazi do netačne procene isparavanja). Takođe, tačnost procene isparavanja je ograničena zbog teškoće u proceni prenosa toplote kroz stranice posude. Prilikom rada evaportimetra posebna pažnja se poklanja održavanju okolnog pokrivača, jer visoka trava može značajno da utiče na kretanje vetra iznad posude, pa samim tim i na isparavanje.

Plutajući isparitelj ima idealan položaj, jer se sud sa vodom koja isparava nalazi u istom (vodenom) okruženju. Međutim, veliki nedostatak ovako postavljene plutajuće posude je njena nepristupačnost, odnosno otežano održavanje i prikupljanje podataka. Veliki problem mogu da budu nepouzdani podaci o isparavanju usled dejstva talasa, tj. veoma je teško sprečiti prskanje vode u posudu ili iz nje.

Sudovi postavljeni iznad zemlje su jeftiniji, lakši za instalaciju i održavanje. Detekcija curenja i pražnjenja

vode iz rezervoara kod ovako instaliranih evaporimetara je jednostavna. Glavni nedostatak nadzemnih evaporimetara je mogućnost da sud bude izložen zračenju sa strane i dna, što rezultira većom brzinom isparavanja. Nepovoljni efekti na bočnim zidovima mogu se u velikoj meri eliminisati korišćenjem izolovane posude, ali to dodatno povećava troškove.

Prema Svetskoj meteorološkoj organizaciji [13] u upotrebi su 27 vrsti isparitelja (najverovatnije ovaj broj je daleko od konačnog), što jasno ukazuje na raznolikost ideja za merenje isparavanja. U radu je dat kratak prikaz najčešće korišćenih isparitelja u svetu.

Evaporimetar klase A (Vremenska služba Sjedinjenih Američkih Država) je najčešći tip standardizovanog suda za merenje isparavanja. Sud je prečnika 1,21 m i visine 25,5 cm. Izrađuje se od pocinkovanog lima ili nerđajućeg čelika i postavlja se na rešetkastoj platformi (najčešće drvenoj) oko 15 cm iznad zemlje. Sud se puni vodom do 5 cm ispod gornje ivice, i nivo se održava tako da voda ne padne više od 7,5 cm ispod ivice. Merenje isparavanja se vrši u komori za umirenje. Komora je cilindričnog oblika sa malom rupom na dnu, koja omogućuje izravnanje nivoa vode.

Ukopani Kolorado sud (Kolorado državni institut) je kvadratnog poprečnog preseka, sa ivicama dužine 92 cm i dubine 46 cm. Ovakav sud pravi se od lima debljine 3 mm i instalira se u zemlju sa obodom 5 cm iznad nivoa tla. Sud se boji crnom katranskom bojom. Nivo vode se održava na ili malo ispod nivoa tla, tj. 5-7,5 cm ispod oboda suda.

U Rusiji i u sovjetskim republikama je u upotrebi isparitelj GGI-3000 (Državni hidrološki institut Sovjetskog Saveza). To je cilindrični rezervoar sa konusnom osnovom napravljen od pocinkovanog lima, prečnika 61,8 cm (površina 3.000 cm2) i dubine 60 cm - na zidu rezervoara i 68,5 cm - u sredini. Rezervoar se ukopava u zemlju, sa obodom približno 7,5 cm iznad tla. Sličan ukopani rezervoar, sa levkom, se postavlja pored isparitelja i služi za merenje padavina.

U Kini, za potrebe posmatranja isparavanja na meteorološkim stanicama od 2002. godine primenjuje se evaporimetar E601B (Meteorološka uprava Kine), dok su ranija osmatranja (od 1950-ih) vršena pomoću D20 suda. Isparitelj E601B je cilindričnog oblika, prečnika 61,8 cm i dubine 68,7 cm i pravi se od fiberglasa. Postavlja se tako što se ukopava u zemlju, sa otvorom oko 30 cm iznad površine tla.

Rezervoar od 20 m2 (Državni hidrološki institut Sovjetskog Saveza), je cilindrični bazen sa ravnim dnom od 4-5 mm limenih ploča ili betona. Površina bazena je 20 m2, sa prečnikom 5 m i dubinom od 2 m. Instalira se ukopavanjem u zemlju, gde je obod suda na 7,5 cm iznad nivoa zemlje. Nivo vode se održava približno u nivou zemlje. Sastavni delovi evaporimetra su posuda za dopunu vode, bunar za umirenje i cev na koju se postavlja volumetrijska bireta, kada se meri nivo vode u rezervoaru.

4 NESIGURNOSTI I IZAZOVI

Da bi se odredila ukupna nesigurnost povezana sa isparavanjem iz isparitelja, svi dominantni izvori nesigurnosti moraju se prvo razumeti i kvantifikovati. Dominantne nesigurnosti odnose se na karakteristike suda, na preciznost merne opreme i na karakteristike lokacije - okruženja isparitelja [4].

4.1 NESIGURNOST MERENJA VEZANA ZA KARAKTERISTIKE ISPARITELJA

Isparitelji zasnovani na proceni isparavanja iz suda predstavljaju najčešće korišćene instrumente za praćenje isparavanja. S obzirom da postoji veliki broj isparitelja zasnovanih na ovom principu razvijen je koeficijent konverzije, koji omogućuje poređenje rezultata isparavanja između različitih isparitelja.

Svetska meteorološka organizacija predložila je da rezervoar za isparavanje od 20 m² bude standardna oprema za isparavanje sa slobodne površine vode i da se koeficijenti konverzije računaju u odnosu na taj isparitelj, prema relaciji [7]:

$$R = \frac{E_{20}}{E_s} \tag{5}$$

gde su E_{20} i E_s količine isparavanja iz rezervoara za isparavanje od 20 m^2 i drugog posmatranog isparitelja, respektivno. Vrednost koeficijenta blizu jedinice znači da je količina isparavanja iz isparitelja numerički bliska onoj izmerenoj preko rezervoara od 20 m^2 (vrednost koeficijenta konverzije za isparitelj klase A i GGI-3000 su bile u sredini, sa vrednostima 0,82 i 0,88, respektivno).

Ovakav oblik jednačine dobijen je sveobuhvatnim istraživanjem koje je sprovela Svetska meteorološka organizacija i analize su obuhvatile [7]: sezonske promene koeficijenata konverzije, međugodišnje promene koeficijenata konverzije, uticaj metoda instalacije, uticaj strukture i materijala isparitelja na koeficijente konverzije. Na osnovu rezultata ispitivanja, utvrđeno je da su varijacije koeficijenata konverzije tokom godine imale isti obrazac ponašanja, bez obzira na korišćeni isparitelj. Takođe, uočeno je da je moguća promena vrednosti koeficijenta konverzije iz godine u godinu, ali sa neznatnim varijacijama.

Fu i saradnici [8] detaljno su analizirali koeficijente konverzije, poređenjem 15 različitih isparitelja svrstanih u četiri kategorije u periodu od 1985. do 1990. godine:

- sudovi za isparavanje različitih površina -100 m², 20 m², 5 m², 3 m² i 1 m²,
- isparitelj klase A, isparitelj GGI-3000 (GGI3000-1), isparitelj E601 (E601-1), isparitelj ϕ20 (ϕ20) i cevni isparitelj sa prečnikom od 80 cm (ϕ80),
- cev GGI-3000 (GGI3000-2), GGI-3000 poluzakopan u zemlji (GGI3000-3), izložen GGI-3000 (GGI3000-4) i posuda E601 bez nagiba (E601-2) i
- fiberglas isparitelj E601 (E601-3).

Rezultati ispitivanja izdvojili su sud sa površinom od 3 m2 i isparitelj E601 kao najpovoljnije, tabela 1.

Tabela 1 – Godišnji prosek koeficijenta konverzije za različite isparitelje [8]

Isparitelj	Koeficijent konverzije
E601-1	0,99
E601-2	1,07
E601-3	0,98
GGI3000-1	0,99
GGI3000-2	0,95
GGI3000-3	0,96
GGI3000-4	0,82
Klasa A	0,87
ϕ80	0,88
1 m2	0,93
3 m2	1,00
5 m2	0,99
ϕ20	0,60

4.2 PRECIZNOST MERNE OPREME

4.2.1 Materijal i veličina evaporimetra

Materijal od koga je napravljena posuda ima veliki uticaj na isparavanje i na moguća odstupanja kod istih isparitelja. Osnovni uticaj materijala posude (npr. pocinkovano gvožđe, bakar ili PVC) na isparavanje je promena toplotne provodljivosti, što dovodi do dnevnih razlika u skladištenju energije koje utiču na brzinu isparavanja.

Najčešće primenjivan evaporimetar, Isparitelj klase A izrađen je od pocinkovanog lima ili prohroma debljine 0,8 mm. U praktičnoj upotrebi ovakvog isparitelja (utvrđivanje rasporeda navodnjavanja) prisutne su brojne teškoće, kao što je velika veličina, glomaznost, visoki troškovi, održavanje, svakodnevno merenje i premeštanje [20]. Stoga je bilo pokušaja da se razviju i standardizuju isparitelji male veličine i od PVC materijala. Manikandan i saradnici [21] izvršili su uporednu analizu Isparitelja klase A i Isparitelja visine 25 cm i prečnika 30, 20, i 10 cm od pocinkovanog lima i PVC materijala. Rezultati su pokazali da posude manjeg prečnika registuju veću brzinu isparavanja, a isto i posude od PVC pokazuju veće isparavanje od metalnih mini isparitelja. Posude prečnika 20 i 30 cm koje su od metala, imale su najbliže rezultate sa Sudom klase A. Kao dodatak uporednoj analizi, autori su uradili i regresionu analizu i zaključili da se isparavanje iz PVC i mini sudova značajno razlikuje od isparavanja sa Suda klase A zbog termičkih i radijacionih karakteristika posuda.

4.2.2 Izazovi pri merenju padavina

Sastavni deo merenja nivoa vode u isparitelju je i merenje padavina. Tačno merenje padavina u određenoj tački je konceptualno jednostavno, ali podložno je mnogim izvorima grešaka. Prema Bonacci [9], usled netačnog merenja kod kišomera, greške mesečnog isparavanja kod Suda klase A idu u rasponu od 4,4 do 17,2%.

Kišomer se instalira u neposrednoj blizini Isparitelja klase A, ali od značaja za pojavu grešaka, pre svega sistemskih, je da otvor isparitelja i kišomera nisu na istoj visini, odnosno prema uputstvu RHMZ-a, kišomer se postavlja tako da mu otvor bude 1 m udaljen od tla [22]. Uzroci sistemskih grešaka su [9]:

- aerodinamički efekti,
- vlaženje unutrašnjih zidova kišomera,
- isparavanje akumulirane vode u posudi,
- nemogućnost potpunog pražnjenja merne posude i
- prskanje kapi kiše dalje od kišomera.

Od svih navedenih uzroka najveći značaj imaju aerodinamički efekti jer strujanje vetra preko kišomera stvara uzgon i turbulenciju koji skreću putanje kapljica kiše. Shodno ovome sve vrste kišomera imaju tendenciju potcenjivanja padavina, jer nisu u mogućnosti da beleže sve padavine [10]. Prema Bonacci [9], poznavanje vertikalne distribucije brzine vetra, koja se zasniva na logaritamskoj raspodeli, može pomoći kod izračunavanje ukupne greške kod merenja padavina.

Bitno je napomenuti da grube greške kod merenja padavina, izazvane ljudima, mogu biti veće od sistemskih i slučajnih grešaka, međutim Allen i saradnici [23] napominju da sa iskustvom operatera moguće je značajno smanjiti ove greške.

4.3 UTICAJ ZAŠTITNE MREŽE

U isparitelju je prisutna značajna količina vode koja, posebno u letnjim mesecima, privlači ptice i druge životinje, što može izazvati gubitak vode a samim tim i kompromitovati rezultate merenja. Kao vid zaštite primenjuje se zaštitna mreža, koja se postavlja preko isparitelja. Mreža utiče na brzinu isparavanja, smanjenjem brzine vetra blizu površine koja isparava što izaziva povećanje debljine graničnog sloja [11] Mnogi autori [12, 24, 25] dali su preporuke za smanjenje isparavanja usled uticaja zaštitne mreže.

Rezultati FAO (Food and Agriculture organization at United Nations) grupe [12] pokazali su da zaklon preko suda smanjuje evaporaciju za 10%. Takođe, van Dijk [24] je uporedio isparavanje iz Suda klase A sa i bez zaštitnih mreža i zaključio je da je prosečno smanjenje isparavanja, usled prisustva mreže, oko 7%.

Poseban problem može da predstavlja dimenzija (debljina) zaštitne mreže. Suhttlewoth [25] navodi da je u zavisnosti od dimenzija mreže moguće dostići smanjuje isparavanja u granicama od 10 do 20%.

4.4 PROBLEMI PRI RADU

Većina isparitelja je većim delom vremena bez nadzora. Gubitak vode usled dejstva jakog vetra može se pogrešno protumačiti kao isparavanje iz isparitelja. Naime, velike brzine vetra (više od 7 m/s) proizvode prskanje vode iz isparitelja [26].

Chu i saradnici [26] su istražvali uticaj palete, kod Suda klase A, na isparavanje. Eksperimentalni rezultati pokazali su da su brzine ispravanja vode veće (u rasponu od 4 do 19%) u situaciji sa paletom ispod suda nego li u situaciji bez palete, pri različitim brzinama.

4.5 ŽIVOTNA SREDINA I URBANIZACIJA

Životna sredina ima veliki uticaj na isparavanje, odnosno na brzinu isparavanja iz suda može uticati vrsta pokrivača tla, uticaj okolnih objekata (zaklon od vetra i senke) i kvalitet vode u sudu [13]. Shodno ovome, izvori grešaka u praćenju isparavanja uključuju faktore okoline kao što su lokacija, instalacija, ometanje strujanja vetra i advektivni izvori toplote. Posebna pažnja posvećuje se kvalitetu vode u isparitelju gde osnovna zagađenja potiču od lišća, prašine i insekata koji upadaju u sud i utiču na kvalitet vode i sposobnost isparavanja.

Urbanizovane gradske celine predstavljaju posebnu životnu sredinu, gde se uticaj urbanizacije na isparavanje može odrediti analizom razlike isparavanja u gradskoj i ruralnoj sredini. Razlika isparavanja u urbanizovanoj sredini između perioda promene i osnovnog perioda predstavlja kombinovani efekat klimatskih promena i urbanizacije na isparavanje. Uticaj urbanizacije se pre svega manifestuje kao vid smanjenja brzine vetra i sunčevog zračenja i kao povećanje temperature vazduha i deficita pritiska vodene pare, što za posledicu ima promenu veličine isparavanja.

Li i Gao [14] su sproveli istraživanje o uticaju urbanizacije na isparavanje, u Kini za period od 1985. do 1998. godine. Rezultati su pokazali da je godišnje isparavanje na gradskim stanicama bilo veće nego na ruralnim stanicama, u granicama od 50 do 200 mm. U većini analiziranih regiona urbanizacija je dovela do povećanja isparavanja, što je rezultiralo povećanjem trenda od 6,69 mm/god, tokom perioda brze urbanizacije od 1985. do 1998. godine.

5 ZAKLJUČAK

Rad predstavlja osnovne nesigurnsti i izazove koji su sastavni deo merenja isparavanja, odnosno sagledavanjem problematike vezane za proces prikupljanja podataka o isparavanju omogućuje se uvid u potencijalne rizike pri merenju. Kako bi problemi oko rada sa ispariteljima bili još jasniji, teoretski je rasčlanjen proces isparavanja (na metod transfera vlage, metod energetskog bilansa i na metod vodnog bilansa) i svi podprocesi su posebno objašnjeni. Takođe, u radu su u kratkim crtama prikazani najčešće korišćeni tipovi evaporimetara koji su zasnovani na sudu za isparavanje. Nesigurnosti i izazovi sagledani su uvidom u probleme sa: karakteristikama evaporimetara, preciznošću merne opreme, uticajem zaštitne mreže, problemima pri radu isparitelja i uticajima koji dolaze od strane životne sredine. Greške (sistematske, slučajne i grube) su sastavni deo merenja i zato se težilo da se tipične i najčešće greške što detaljnije obrade, kako bi se lakše prevazišli svi izazovi i potencijalni rizici pri radu isparitelja.

Pored informacija o samom procesu evaporacije za prikupljanje tačnih i reprezentativnih podataka potrebna je i dokumentacija koja treba da sadrži opis: vegetacije i okolne životne sredine, vlage u tlu, padavina i primenjenih tipova merne opreme. Veoma je važno održavati visok standard rada, kako bi se omogućili konzistentni i pouzdani podaci, uz rigoroznu kontrolu kvaliteta istih.

Buduća studija odnosiće se na ispitivanje uticaja različitih tipova zaštitnih mreža na isparavanje iz Suda klase A. Takođe, uticaj različitih sredina (urbanih i ruralnih) na ispravanje biće detaljno analiziran.

ZAHVALNOST

Ovo istraživanje je podržalo Ministarstvo za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije, Ugovorom o finansiranju naučnoistraživačkog rada zaposlenih u nastavi na Građevinsko - arhitektonskom fakultetu, Univerziteta u Nišu - Evidencioni broj: 451-03-34/2026-03/200095 od 05.02.2026. god, kao i projekat Srpske akademije nauka i umetnosti, Ogranak u Nišu – Evidencioni broj: 0-15-18.

LITERATURA

[1] Chow V. T., Maidment D. R., Mays L. W.: **Applied hydrology**. *McGraw-Hill Inc*, New York, USA, 1988.

[2] Friedrich Katja, Grossman Robert, Huntington Justin, Blanken Peter, Lenters John, Holman Kathleen, Gochis David, Livneh Ben, Prairie James, Skeie Erik, Healey Nathan, Dahm Katharine, Pearson Christopher, Finnessey Taryn, Hook Simon, Kowalski Ted: **Reservoir evaporation in the western United States – current science, challenges and future needs**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 99, 167-187, 2018.

[3] Stanhill Gerald: **Is the Class A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements**. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 112, 233-236, 2002.

[4] Lowe Lisa, Angus Webb J., Nathan Rory, Etchells Teri, Malano Hector: **Evaporation from water supply reservoirs: An assessment of uncertainity**. *Journal of Hydrology*, No. 376, 261-274, 2009.

[5] Allen Richard, Pereira Luis, Raes Dirk, Smith Martin: **Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)**. *FAO Irrigation and Drainage*, Rome, Italy, 1998.

[6] Li Xianghui, Ju Yan, Wu Lifeng, Fan Junliang, Zhang Fucang, Li Zhijun: **Daily pan evaporation modeling from local and cross-station data using three tree-based machine learning models**. *Journal of Hydrology*, Vol. 566, 668-684, 2018.

[7] WMO-No.8 (World mereorological organization): **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. *Secretariat of the World Meteorological Organization*, Geneva, Switzerland, 2006.

[8] Fu Guobin, Liu Changming, Chen Shulin, Hong Jialian: **Investigating the conversion coefficients for free water surface evaporation of different evaporation pans**. *Hydrological Processes*, No. 18, 2247-2262, 2004.

[9] Bonacci Ognjen: **The influence of errors in precipitation measurements on the accuracy of the evaporation measurements performed by a Class A evaporation pan**. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 43, 181-183, 1991.

[10] Dingman Lawrence: **Physical hydrology**. *Waveland Press, Inc.*, Long Grove, Illinois, USA, 2015.

[11] Brutsaert Wilfried: **Evaporation into the atmosphere, theory, history and applications**. *Springer – Science + Business Media*, Dordrecht, Nederland, 1982.

[12] Dorenbos J., Pruitt W.O.: **Guidelines for predicting crop water requirements**. *FAO Irrigation and Drainage*, Rome, Italy, 1975.

[13] WMO-No.83 (World mereorological organization): **Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration**. *Secretariat of the World Meteorological Organization*, Geneva, Switzerland, 1966.

[14] Li Jiaqi, Gao Bing: **How urbanization affects pan evaporation in China**. *Urban Climate*, No. 49, 1-15, 2023.

[15] McMahon T. A., Peel M. C., Lowe L., Srikanthan R., McVicar T., R.: **Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis**. *Hydrolgy and Earth System Sciences*, No. 17, 1331-1363, 2013.

[16] Jensen Marvin, Allen Richard, Howell Terry, Martin Derrel, Snyder Richard, Walter Ivan: **Evaporation, evapotranspiration and irrigation water requirements**. *American Society of Civil Engineers*, Reston, Virginia, USA, 2016.

[17] Brutsaert Wilfried: **Hydrology an introduction**. *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, 2005.

[18] Abtew Wossenu, Melesse Assefa: **Evaporation and evapotranspiration - measurements and estimations**. *Springer*, Dordrecht, Nederland, 2013.

[19] McCuen Richard: **Hydrologic analysis and design**. *Prentice Hall*, New Jersey, USA, 1998.

[20] Amir Azimi Mohammad, Javad Manshti Mohammad, Ghods Motahari Amir, Karami Amin, Rostami Kourosh: **Determining hourly evaporation measurement accuracy of small pans in comparison with Class-A pan**. *Asian Journal of Applied Sciences*, Vol. 3, No. 6, 844-847, 2015.

[21] Manikandan N., Panigrahi P., Pradhan S., Rautaray S. K., Kar G.: **Evaluating mini pan evaporimeter for on-farm irrigation scheduling**. *Journal of Agrometeorology*, Vol. 22, 243-247, 2020.

[22] HS (Hidrometeorološka služba): **Uputstvo za osmatranja i merenja na glavnim meteorološkim stanicama.** *Savezni hidrometeorološki zavod*, Beograd, SFRJ, 1974.

[23] Allen Richard, Pereira Luis, Howell Terry, Jensen, Marvin: **Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy**. *Agricultural Water Management*, No. 98, 899-920, 2011.

[24] van Dijk M. H.: **Reduction in evaporation due to the bird screen used in the Australian class A pan evaporation network**. *Australian Meteorological Magazine*, Vol. 33, No. 4, 181-183, 1985.
[25] Shuttleworth James: **Evaporation. In Handbook of hydrology,** edited by Maidment David. *McGraw-Hill Inc*, New York, USA, 1993.
[26] Chu Chia-Ren, Li Ming-Hsu, Chang Yu-Feng, Liu Tsung-Chiang, Chen Yi-Ying: **Wind-induced Splash in Class A evaporation pan**. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, 1-7, 2012.