ANALIZA INFILTRACIJE OBORINA NA ALUVIJALNOM TLU

Patrčević, Vladimir; Kopjar, Ana; Đurin, Bojan

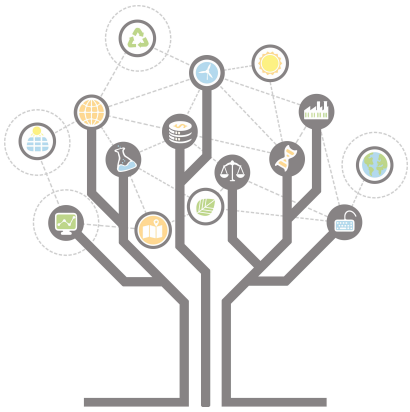
Source / Izvornik: **Inženjerstvo okoliša, 2014, 1, 7 - 18**

Journal article, Published version
Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:825207

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

ANALIZA INFILTRACIJE OBORINA NA ALUVIJALNOM TLU

ANALYSIS OF RAINFALL INFILTRATION ON THE ALLUVIAL SOIL

Vladimir Patrčević [1], Ana Kopjar [2] Bojan Đurin [3]
[1] Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA, vlapatr@gfv.hr,
[2] Hrvatske vode, Vodnogospodarska ispostava za mali sliv "Trnava", I. Mažuranića 2, Čakovec, HRVATSKA, ana34kopjar@gmail.com
[3] Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, HRVATSKA, bojan@gfv.hr

Sažetak: *Ovim se radom želi dati doprinos dosadašnjim spoznajama na području poznavanja vertikalnih procesa u hidrološkom ciklusu. To se odnosi na vodopropusne prostore riječnog aluvija, koji nisu u neposrednoj vezi sa površinskim vodnim režimom vodotoka. Cjelovito upoznavanje tih hidroloških procesa i prirodnih zakona gibanja vode u vertikalnoj izmjeni moguće je jedino istraživačkim radom. Direktnim mjerenjem i hidrološkom analizom čimbenika vertikalne vodne bilance podzemnih voda na infiltrometarskoj stanici „Varkom" u Varaždinu od 1988. godine, moguće je bliže upoznati procese infiltracije i evapotranspiracije, a koji su karakteristični za klimatske osobine sjeverozapadnog prostora Republike Hrvatske.*
Ključne riječi: *oborine, infiltracija, vertikalna vodna bilanca, eksperimentalna stanica, hidrološki sustav.*

Abstract: *This paper aims to contribute to current state of the art in the field of knowledge of vertical processes in the hydrological cycle. These are broad and well permeable areas of river alluvium, which are not directly related to surface water regime of the watercourse. Most fully exploring these hydrological processes and natural laws of motion of water may be the only exploratory work. By direct measurement from year 1988. and by analysis of hydrological factors of the vertical water balance of groundwater at the infiltration station "Varkom" it is possible to get to know processes of the infiltration end evapotranspiration, which are characteristic of the climate region of the northwestern area of Croatia.*
Keywords: *precipitation, infiltration, vertical water balance, experimental station, hydrological system.*

Received: 07.01.2014 / Accepted: 09.05.2014

Znanstveni rad

1. UVOD I DOSADAŠNJE SPOZNAJE

Infiltracija je hidrološki proces vertikalnog gibanja vode kroz prozračnu zonu zemljišta, od površine zemljišta prema slobodnom nivou podzemne vode, uslijed djelovanja kapilarnih sila i sile gravitacije. Proces se odvija kroz pore zemljišta koje su ispunjene vodom i zrakom i direktno utječe na promjenu vlažnosti u prozračnoj zoni. Voda koja učestvuje u tom procesu pripada gravitacijskoj vodi. Ukoliko uslijed infiltracije dođe do podizanja slobodnog nivoa podzemne vode, odnosno do promjene granice između zasićene i prozračne zone zemljišta, taj dio procesa infiltracije se naziva efektivna infiltracija ili perkolacija.

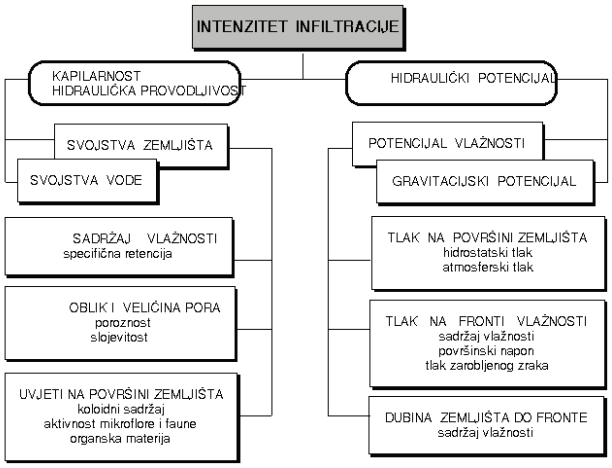
Proces infiltracije počinje u trenutku prispijeća oborine iz atmosfere na površinu zemljišta. U tom trenutku na površini zemljišta se stvara saturirani sloj ispod kojega se nalazi prozračna zona sa nižim potencijalom vlažnosti. Kroz pore većih dimenzija, voda se vertikalno giba nadolje prvenstveno pod djelovanjem sile gravitacije odnosno gravitacijskog potencijala kao gravitacijska voda. Pore manjih dimenzija, u prvom trenutku preuzimaju vodu iz gornjeg zasićenog sloja u obliku kapilarne vode, zbog djelovanja molekularnih sila odnosno kapilarnog potencijala. U ovom procesu očito je da oba potencijala djeluju u istom smjeru čime se hidraulički potencijal pojačava.

Intenzitet infiltracije f je zbog toga najveći na početku procesa, odnosno u trenutku prispijeća oborine na površinu nezasićenog zemljišta. Proces infiltracije će se vremenom smanjivati na račun povećavanja vlažnosti prozračne zone i trajati će tako dugo dokle je razlika u potencijalu vlažnosti zasićenog i nezasićenog dijela zemljišta veća od njegove specifične retencije. Međutim ukoliko je oborina na površinu zemljišta dugotrajna i intenzivna, količina vlažnosti zemljišta iznad prodiruće fronte vlažnosti je stalno iznad vrijednosti specifične retencije, čime je prisutno stalno gravitacijsko gibanje vode u toj zoni. Vremenski povećanjem dubine prodiranja vode, fronta vlažnosti nailazi na dijelove prozračne zone zemljišta sa sve većim sadržajem vlažnosti čime se smanjuje djelovanje kapilarnog potencijala, a time i intenziteta procesa infiltracije.

Intenzitet infiltracije u stvari predstavlja količinu vode koja iz atmosfere ulazi u zemljište u jedinici vremena, u zavisnosti od složenih uvjeta koji su u tom trenutku prisutni. Ti uvjeti posebno uključuju količinu i raspodjelu vlažnosti u prozračnoj zoni zemljišta, hidrauličku provodljivost te zone, te količinu i intenzitet oborine pridošle na površinu zemljišta. Ukoliko je intenzitet oborine veći od intenziteta infiltracije, dolazi do retencije vode na površini i saturacije tog dijela zemljišta. Tada je količina infil-

trirane vode maksimalna za prisutne uvjete zemljišta i nosi naziv infiltracijski kapacitet.

Na veličinu intenziteta infiltracije, kao vrlo složenog hidrološkog procesa utječu mnogobrojni čimbenici, od kojih se oni vezani uz osobine zemljišta mogu prema Gray i Norumu (1968) shematski prikazati slikom 1.



Slika 1. Čimbenici utjecaja na proces infiltracije

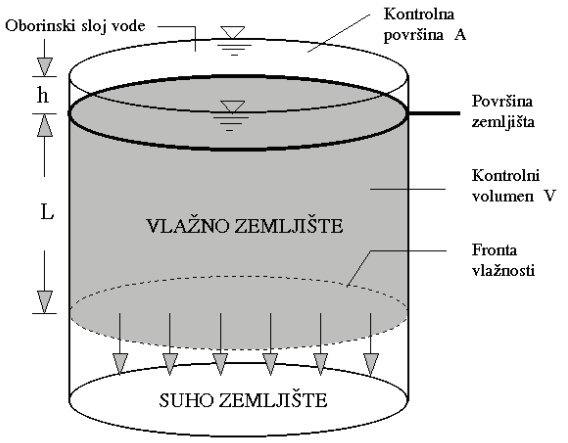
Obzirom da je stupanj zasićenja zemljišta vlagom glavni čimbenik koji bitno utječe kako na kapilarnost i hidrauličku provodljivost tako i na hidraulički potencijal, to je potrebno poznavati vertikalnu raspodjelu vlažnosti u stupcu kontrolnog volumena zemljišta.

Raspodjela vlažnosti u profilu zemljišta prozračne zone može se prema Bodmanu i Culmanu (1944) podijeliti na četiri glavne zone:

a) zasićenu zonu uz samu površinu zemljišta
b) zonu prijenosa vlažnosti sa nezasićenim i približno jednolikim sadržajem vlažnosti
c) zonu vlaženja u kojoj se vlažnost smanjuje sa dubinom
d) frontu vlažnosti, odnosno liniju na kojoj se vrši izmjena vlažnosti između vlažnijeg zemljišta iznad i suhog zemljišta ispod fronte.

Postoje dva osnovna pristupa kod proučavanja i analize hidrološkog procesa infiltracije. To je teorijsko istraživanje sa ciljem iznalaženja analitičkog rješenja parcijalnih diferencijalnih jednadžbi kretanja vode kroz nezasićenu poroznu sredinu i primijenjeno istraživanje u cilju dobivanja empirijskih relacija, odnosno modela na mjernim postajama u prirodnim uvjetima.

Infiltracijska teorija je pri tome razvijana od mnogih istraživača kao što su Horton (1933), Philip (1957), Green i Ampt (1911), Huggins i Monke (1966), Holtan (1961), Crawford i Linsley (1966), Huber (1981), kao i mnogi drugi. Zajedničko u njihovim pristupima je da svi modeli usvajaju postojanje tankog zasićenog površinskog sloja zemljišta h od kojeg započinje proces infiltracije.



Slika 2. Shema Darcy fluksa po dubini L

Jedan od najranijih modela koji opisuje takav proces razvio je Horton uz uvjete konstantnog intenziteta oborine, većeg od infiltracijski kapaciteta zemljišta. Pri tome je ustanovio da infiltracija počinje sa nekim infiltracijskim kapacitetom f_0 i dalje se eksponencijalnim zakonom umanjuje na jednu stalnu vrijednost intenziteta infiltracije f_c koji odgovara infiltraciji slobodne gravitacijske vode kroz pore zemljišta, kada je vlažnost zemljišta dostigla stupanj specifične retencije, a prema jednadžbi (1)

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)\, e^{-kt} \tag{1}$$

Hortonov model infiltracije u stvari predstavlja rješavanje veličine difuzije vlažnosti $D(\theta)$ od saturirane površine zemljišta prema nezasićenoj zoni. Na to su ukazali Eagleson (1970) i Raudkivi (1979) ističući da se Hortonova jednadžba može izvesti iz Richardove jednadžbe, Phoon *et al*. (2007):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(D\frac{\partial \theta}{\partial z} \pm K_n \right) \tag{2}$$

ako se uzme da su veličine K_n i D konstantne vrijednosti, nezavisne od stupnja zasićenja zemljišta vlažnošću. Tada se jednadžba (2) može prikazati u standardnom obliku difuzne jednadžbe (3) čije rješenje daje oblik raspodjele vlažnosti zemljišta u zavisnosti o dubini z i vremenu t.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \tag{3}$$

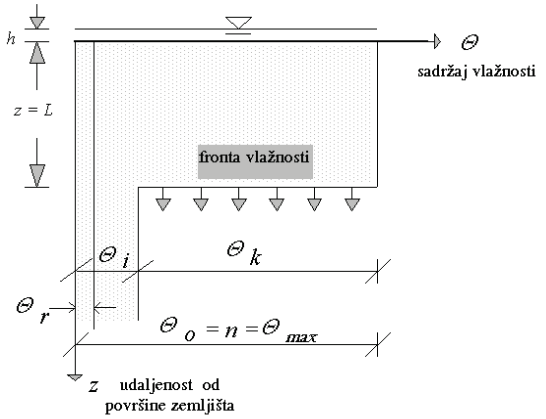
Model koji je predložio Horton, prikazan u Fleming (1975) i Chow *et al*. (1988) predstavlja rješenje difuzne jednadžbe za jednodimenzionalnu, vertikalnu infiltraciju u prozračnoj zoni zemljišta kao jednolikoj i neograničenoj sredini sa konstantnim početnim sadržajem vlažnosti.

Pri tome su veličine hidrauličke provodljivosti K_n i koeficijenta kapilarne difuzije D usvojene kao promjenljive u funkciji vlažnosti zemljišta θ:

$$f(t) = \frac{1}{2}\varphi\, t^{-0,5} + K_n \tag{4}$$

gdje je ϕ parametar zemljišnog upijanja vlažnosti odnosno adsorpcija.

Infiltracija vode kroz prozračnu zonu aluvijalnog, dobro propusnog zemljišta očituje se postojanjem izrazite fronte vlažnosti kod koje je prijelaz od zatečene vlažnosti θ_i do stanja zasićenja θ_0 vrlo nagli i oštri. Takva fronta kroz nezasićeno, porozno zemljište, odlikuje se izrazito strmim profilom vlažnosti. Ta konstatacija opravdava pretpostavku, da se cijeli profil vlažnosti od površine zemljišta do fronte vlažnosti L zamijeni pravokutnim oblikom konstantne vlažnosti θ_k, koja je bliska poroznosti zemljišta n, u slučaju prodiranja fronte u suho zemljište, a kako je prikazano slikom 3, Chow *et al*. (1988).



Slika 3. Varijable u Green-Ampt modelu infiltracije

Takvu pojednostavljenu sliku infiltracije postavili su Green i Ampt (1911) uz pretpostavku da je visina vode h na površini zemljišta zanemarivo mala. Analiziranje modela moguće je preko vertikalnog stupca kontrolnog volumena zemljišta prikazanog slikom 2. Uz pretpostavku početnog sadržaja vlažnosti θ_i konstantnog po vertikali cijelog kontrolnog volumena, prodiranje fronte vlažnosti zemljišta će se naglo povećavati do maksimalne vrijednosti θ_0, koja odgovara veličini poroznosti prozračne zone zemljišta n. Povećanje količine vode u kontrolnom volumenu u iznosu $L(n-\theta_i)$ kroz jediničnu kontrolnu površinu, rezultat je ukupne infiltracije $F(t)$.

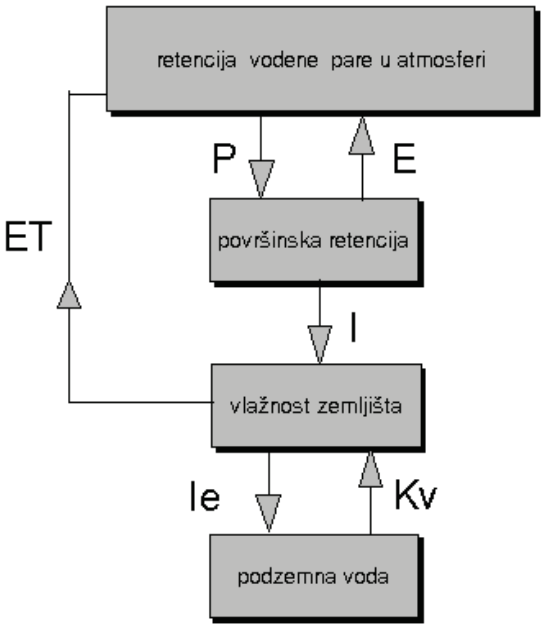
$$f(t) = K_n \left[1 + \frac{\theta_k \, H_k}{F(t)} \right] \tag{5}$$

gdje su:

H_k – kapilarni potencijal
θ_k – konstantna vlažnost zemljišta bliska poroznosti zemljišta.

U ovom radu opisuje se pristup primijenjenog istraživanja u cilju dobivanja empirijske relacije infiltracije sa glavnim čimbenicima, odnosno definiranje modela infiltracije u prirodnim uvjetima na mjernoj stanici Varkom u Varaždinu, Hrvatske vode (1994).

Neposrednim mjerenjem glavnih ulaznih i izlaznih parametara vertikalne vodne bilance podzemnih voda i hidrološkom analizom vodne bilance, mogu se upoznati osnovne osobine hidrološkog sustava u vertikalnoj vodnoj bilanci (slika 1), odnosno glavni hidrološki procesi koji u prirodi određuju vertikalnu izmjenu vode između atmosfere i podzemne vode.



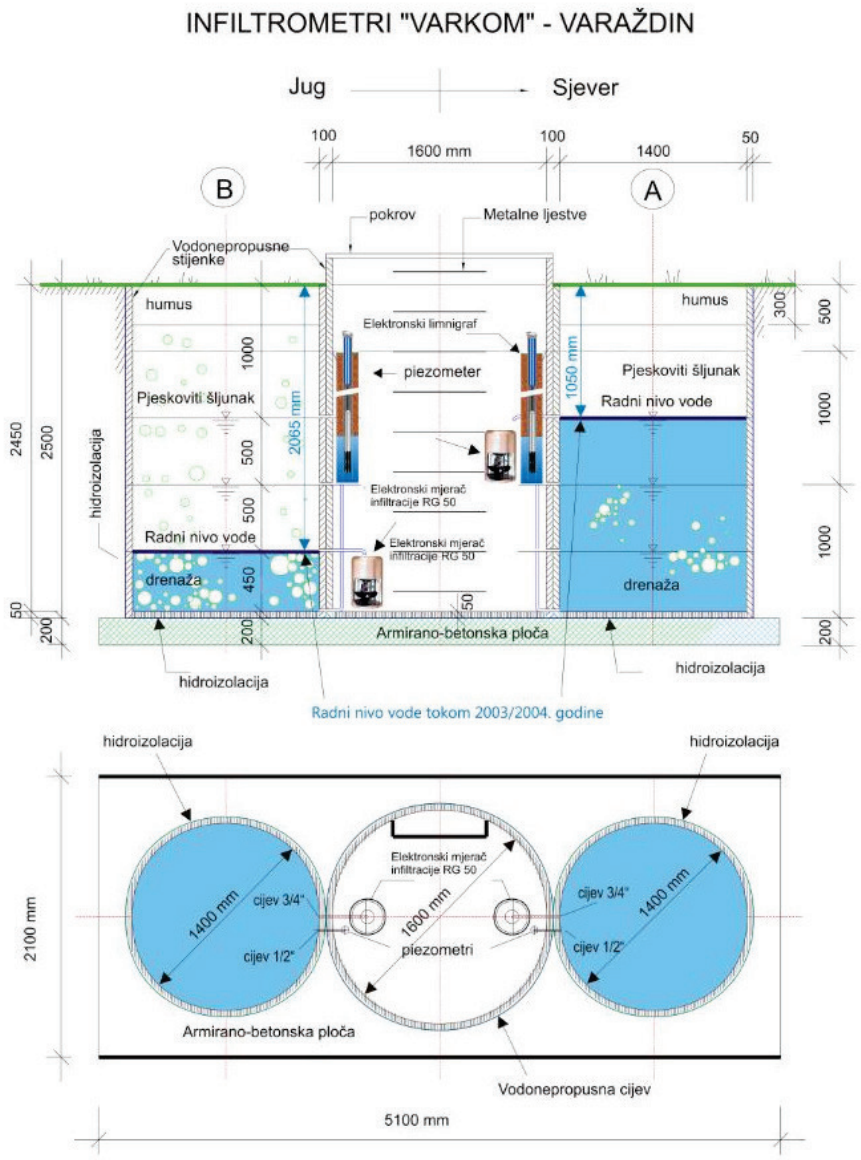
Slika 4. Shema vertikalne vodne bilance

Za takvo upoznavanje hidroloških procesa kao dijelova hidrološkog ciklusa na području sjeverozapadne Hrvatske koristi se infiltrometarska stanica „Varkom“ (slika 5), kao jedan zatvoreni hidrološki sustav u obliku bunara-infiltrometra koji su 1988. godine postavljeni u krugu vodocrpilišta „Varkom“ u širem aluviju rijeke Drave kod Varaždina. Infiltrometarska stanica osnovana je kao eksperimentalna u okviru Studije podzemnih voda za određivanje zaliha i zaštite voda dravske doline na prostoru Vinica-Varaždin-Zamlaka-Varaždin Breg.

Mjerna stanica je započela sa radom 18. listopada 1988. godine. Postavljena je unutar zaštitne zone vodocrpilišta, zapadno od prilazne ceste do kontrolnog centra vodocrpilišta. Stanica se sastoji od mjernih bunara - infiltrometara kao zatvorenog hidrološkog sustava u kojima je uspostavljen kontrolni volumen nezasićene (prozračne zone) okolnog zemljišta riječnog aluvija i zasićene zone sa kontroliranim nivoom podzemne vode.

2. OPIS HIDROLOŠKOG SUSTAVA

Hidrološki sustav infiltrometara predstavljen je infiltrometrima u obliku dva bunara izrađena od vodonepropusnog materijala, temeljena na armirano-betonskoj ploči na dubini 250 cm od površine zemljišta. Infiltrometar A i infiltrometar B profila Φ 1400 mm služe kao mjerni bunari, Hrvatske vode (1994).



Slika 5. Hidrološki sustav „Varkom“ Varaždin

Na dijelu aluvijalnih nanosa prostora vodocrpilišta "Varkom" nalaze se uglavnom pjeskoviti šljunci homogenog sastava sa istim hidrogeološkim osobinama sloja aluvijalnog zemljišta koje se nalazi i u bunarima infiltrometrima.

Geološki sastav zemljišta sadržan u prozračnoj zoni infiltrometara na površini sadrži sloj humusa sa prirodnom livadnom travom.

Dakle isti se geološki sastav zemljišta sadrži u prozračnoj zoni infiltrometara sa međuzrnatom volumenskom poroznosti od n = 25%. Hidraulička provodljivost K određena je sa vrijednosti od 9.0 cm/s što odgovara strukturi okolnog zemljišta do dubine od 16.0 m.

Koeficijent efektivne poroznosti zemljišta u sustavu infiltrometra određen je sa veličinom $\eta = 0.18$

Dakle, analiza procesa infiltracije u prirodnim uvjetima na mjernoj stanici Varkom u Varaždinu obavlja se uspostavljanjem dva zatvorena hidrološka sustava u kojima se odvija proces vertikalne izmjene vode (slika 7) između atmosfere i podzemne vode na određenoj dubini.

Srednji bunar Φ 1600 mm je radni bunar i služi kao kontrolno mjesto u kojem se nalaze mjerni uređaji za mjerenje izlaznih parametara vertikalne vodne bilance.

U zoni mikrolokacije infiltrometara je postavljena i automatska meteorološka stanica (slika 6). Stanica je opremljena kišomjerom za kontinuirano mjerenje oborina (elektronski ombrograf).

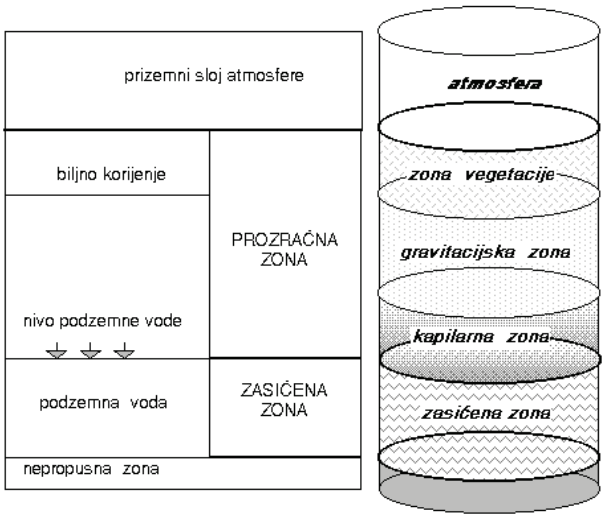
Svi ostali podaci mjerenja: infiltracija (elektronski mjerači efektivne infiltracije), temperatura zraka (elektronski termometar), evaporacija (elektronski isparitelj klase A) prikupljaju se na centralni uređaj (logger) u 60 minutnim vremenskim intervalima.

Mjerno mjesto je opremljeno elektronskim mjeračima efektivne infiltracije i elektronskim limnigrafima za mjerenje promjene nivoa vode zasićene zone bunara.

Pristup mjeračima omogućen je radnim bunarom, pomoću silaznih ljestava za pristup motritelja. Ugrađena je manja automatska, potopljena crpka za izbacivanje prikupljene vode od efektivne infiltracije sustava infiltrometara (slika 8).



Slika 6. Meteorološka stanica na Infiltrometru „Varkom“ Varaždin



Slika 7. Zone infiltracije u hidrološkom sustavu



Slika 8. Radni bunar na infiltrometru Varaždin

3. PROGRAM ISTRAŽNIH RADOVA

Na infiltrometarskoj stanici „Varkom“ od 1988. godine obavljaju se svakodnevna kontinuirana mjerenja najvažnijih procesnih čimbenika vertikalne vodne bilance.

Kao **ulazni parametri** u jednadžbu vertikalne vodne bilance provode se kontinuirana mjerenja:

- Mjerenje oborine
- Mjerenje temperature zraka
- Mjerenja isparivanja (isparitelj klase-A)

Kao **izlazni parametri** u vertikalnoj vodno-bilancnoj jednadžbi provode se kontinuirana mjerenja:

- Mjerenje efektivne infiltracije
- Mjerenje promjene nivoa podzemne vode u bunarima - infiltrometrima

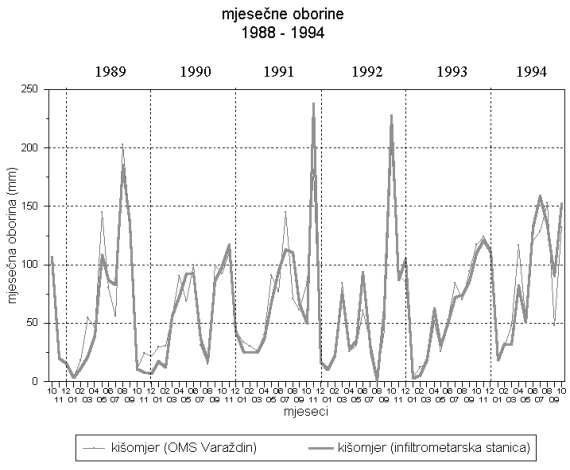
Prikupljaju se i odgovarajući klimatološki podaci na meteorološkoj stanici OMS Varaždin na kojoj postoje i mjerenja isparivanja sa isparitelja klase-A. Meteorološka stanica OMS Varaždin udaljena je cca 3000 m od infiltrometrijske stanice „Varkom“. Obrada i analiza izmjerenih i prikupljenih podataka obavlja se godišnje za tekuću hidrološku godinu. U ovom radu prikazuju se ukupni rezultati istraživanja za početno razdoblje od šest hidroloških godina (1988/89 – 1993/94).

4. ANALIZA ULAZNIH PARAMETARA

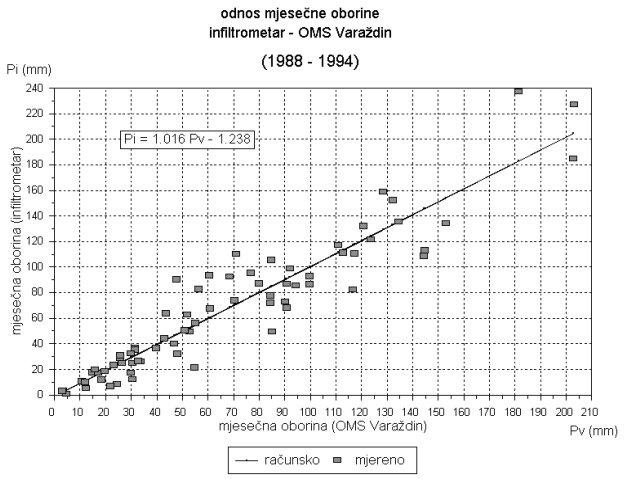
U ulazne parametre hidrološkog sustava spadaju klimatološki čimbenici kao što su oborine, temperatura zraka, isparivanje, te ostali značajni klimatološki parametri. Oborina, isparivanje i temperatura zraka kontinuirano se mjere na meteorološkoj stanici u okviru infiltrometarske stanice „Varkom“.

4.1. Oborine

Mjera za količinu pale oborine predstavljena je visinom stupca vode u kišomjeru. Visina napadanog snijega mjeri se pomoću snjegomjerne letve na tri točke neposredno uz kišomjer i infiltrometre. U razdoblju od 1988. – 1994. godine izmjerene oborine na infiltrometarskoj stanici uspoređene su sa oborinama izmjerenim na meteorološkoj stanici OMS Varaždin. (slika 9)



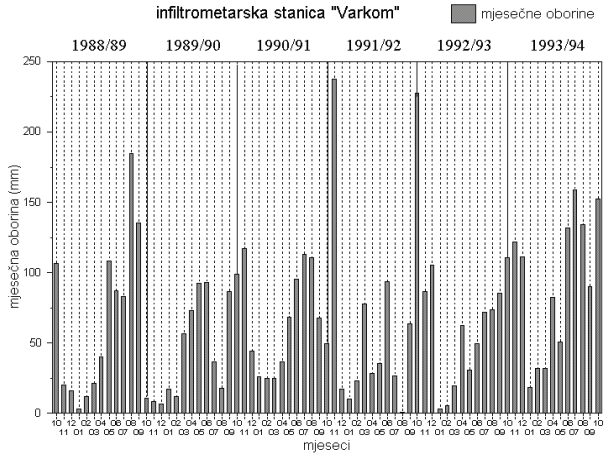
Slika 9. Odnos mjerene oborine



Slika 10. Korelativna zavisnost mjesečnih oborina stanice „Varkom“ i meteorološke OMS stanice VŽ

Koeficijent korelacije odnosa izmjerenih mjesečnih oborina iznosi $r = 0.89$. Usporedni odnos tih vrijednosti prikazan je na slici 9. dok je proračun odnosa linearne korelacije prikazan na slici 10.

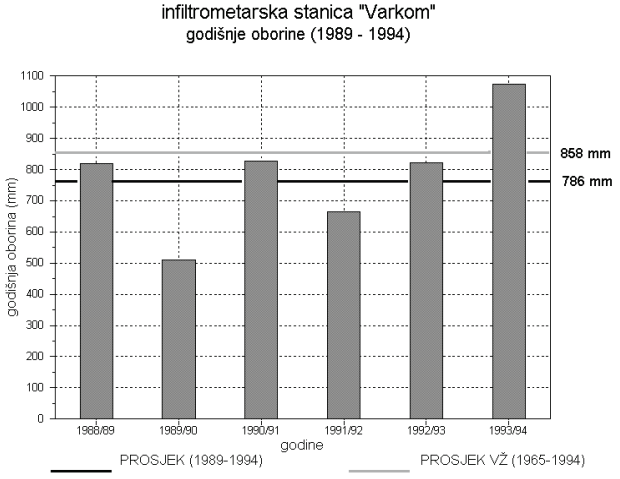
Analiza ukazuje na vrlo slične mikroklimatske osobine prostora infiltrometarske stanice Varkom, sa širim prostorom sjevero-zapadnog dijela Republike Hrvatske koji pokriva meteorološka stanice OMS Varaždin. Oborine kao ulaz u zatvoreni hidrološki sustav infiltrometara izmjerene na infiltrometarskoj stanici „Varkom“ u razdoblju od šest hidroloških godina (1988/89 – 1993/94) pokazane su na slici 11.



Slika 11. Raspored mjesečnih oborina na meteorološkoj stanici infiltrometra Varkom

Prikazane vrijednosti predstavljaju osnovni ulaz u hidrološki sustav za analizu vertikalne vode bilance Dravskog aluvija na širem prostoru između rijeka Plitvice i Drave.

Godišnje vrijednosti izmjerenih oborina na kišomjeru infiltrometarske stanice „Varkom“ sa srednjom vrijednosti iz šestogodišnjeg niza mjerenja od $P = 786$ mm prikazane su slikom 12. Taj je prosjek znatno niži od 30 godišnjeg prosjeka (1965–1994) za meteorološku stanicu OMS Varaždin, koji iznosi $P = 858$ mm.



Slika 12. Godišnje vrijednosti izmjerenih oborina

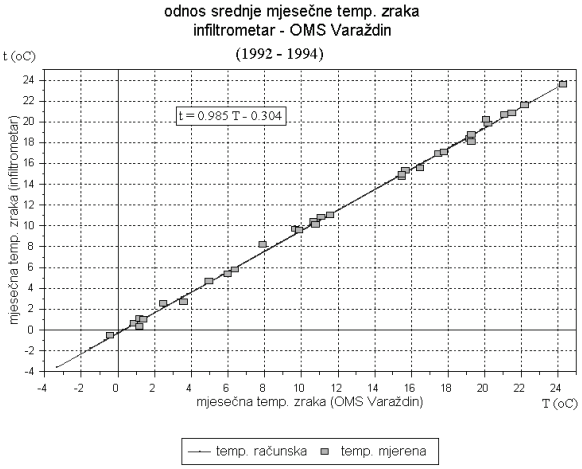
Ti podaci ukazuju da su u ovoj fazi provedenih šest godišnjih istražnih radova isti obavljeni u ciklusu nešto sušnijeg hidrološkog razdoblja, Pandžić *et al*. (2009).

4.2. Temperatura zraka

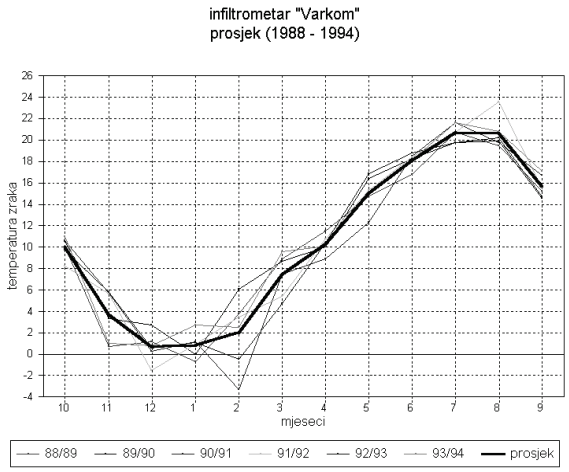
Izmjerene mjesečne temperature zraka na infiltrometarskoj stanici i njihov korelacijski odnos sa mjerenjima na meteorološkoj stanici OMS Varaždin prikazan je slikom 13. Koeficijent korelacije odnosa srednje mjesečne temperature zraka mjerenih na te dvije mjerne stanice iznosi visokih $r = 0.99$.

Takva čvrsta korelacijska veza ukazuje da se većina meteoroloških parametara izmjerenih na OMS Varaždin može prihvatljivo primjenjivati za širi prostor lokacije infiltrometarske stanice Varkom.

Mjesečni hod temperatura zraka izmjerenih na meteorološkoj stanici infiltrometra Varkom za razdoblje od šest hidroloških godina (1988/89 – 1993/94) prikazan je na slici 14.



Slika 13. Izmjerena mjesečna temperatura zraka



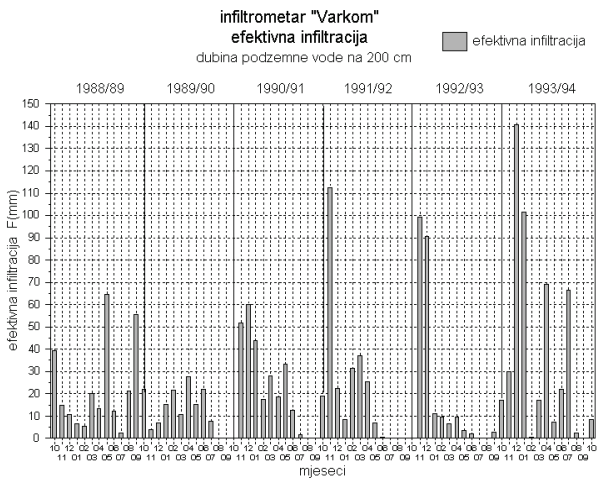
Slika 14. Mjesečni hod temperature zraka

5. ANALIZA IZLAZNIH PARAMETARA

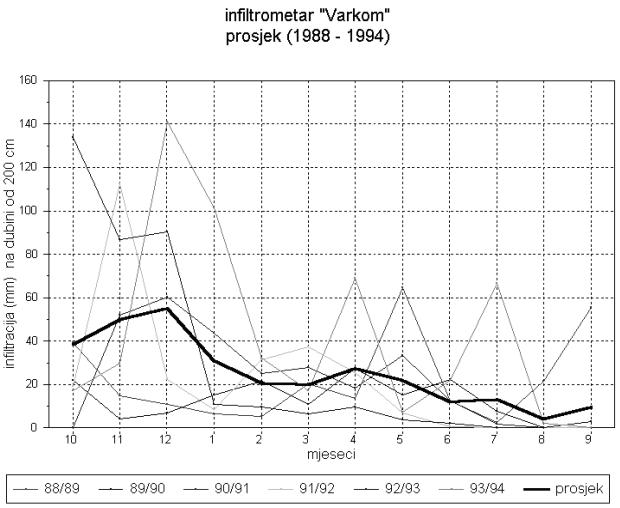
U izlazne parametre hidrološkog sustava koje se mjere na mjernoj infiltrometarskoj stanici „Varkom“ spada efektivna infiltracija kod različitih dubina nivoa podzemne vode. To se odnosi na zasićenu zonu u hidrološkom sustavu-infiltrometru, odnosno u slučaju sniženja nivoa podzemne vode uslijed isparivanja putem kapilarnog izdizanja vode, u kapilarnoj zoni sustava. Efektivna infiltracija pripada hidrološkim procesnim čimbenicima u određivanju vertikalne vodne bilance. Ukupno isparivanje, odnosno stvarna ili aktualna evapotranspiracija je vezana uz efektivnu infiltraciju. Ona predstavlja izlazni, odnosno procesni čimbenik koji pripada klimatološkim parametrima u određivanju vertikalne vodne bilance.

5.1. Efektivna infiltracija

Efektivna infiltracija se mjeri na infiltrometru A i infiltrometru B. U toku istražnih radova (1988/89 – 1993/94) mjerena je efektivna infiltracija do dubine podzemne vode od 200 cm. Rezultati mjerenja efektivne infiltracije na 200 cm dubine podzemne vode prikazani su na slici 15, a mjesečni hod efektivne infiltracije u razdoblju šest godina istražnih radova prikazan je na slici 16.



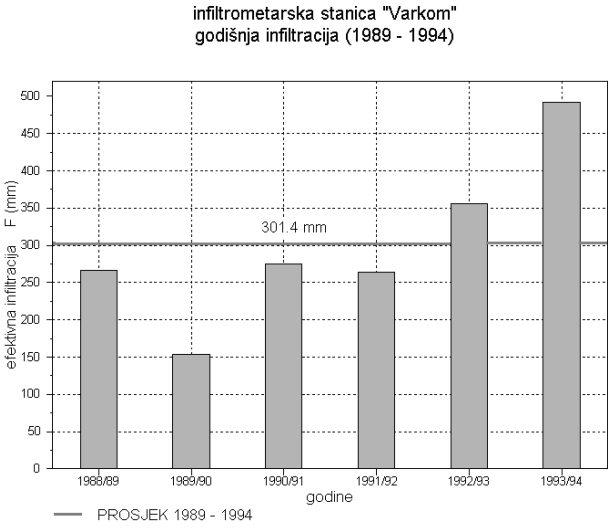
Slika 15. Efektivna infiltracija na 200 cm dubine podzemne vode



Slika 16. Mjesečni hod efektivne infiltracije

Proces infiltracije dobro prati proces pojave oborina, ali samo tokom hladnijeg dijela godine. U toplijem razdoblju godine kada su visoke temperature zraka i unatoč većih oborina, efektivna infiltracija se smanjuje, te gotovo prestaje tokom mjeseca srpnja i kolovoza.

Rezultati godišnje vrijednosti efektivne infiltracije na dubinu od 200 cm podzemne vode za 6-godišnje razdoblje u sustavu infiltrometra prikazani su na slici 17.

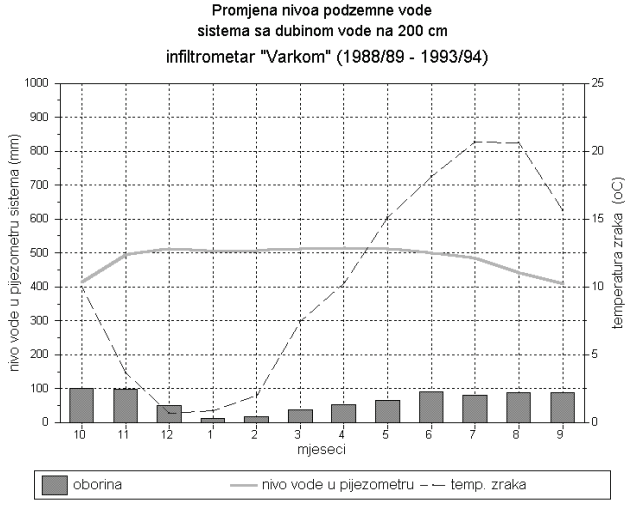


Slika 17. Godišnje vrijednosti efektivne infiltracije

5.2. Promjena nivoa podzemne vode u sustavu infiltrometara (zasićena zona)

Radna dubina podzemne vode u svakom sustavu infiltrometra uočljiva je putem izmjere nivoa vode u pijezometrima sustava. Referentna nula predstavlja dno svakog infiltrometra, odnosno dubina 2500 mm od površine zemljišta.

Znakovite promjene nivoa vode u sustavu u šestogodišnjem prosjeku, prikazane su slikom 18.



Slika 18. Promjena prosječnih nivoa podzemne vode u sustavu infiltrometra tijekom istraživačkog razdoblja

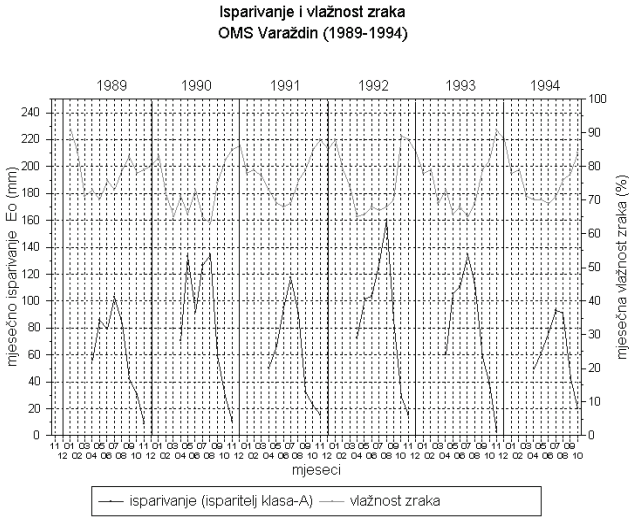
Uz kontinuirano mjerenje snižavanja nivoa vode u mjernim bunarima pomoću elektronskog limnigrafa, te usvojenog koeficijenta efektivne poroznosti zemljišta u sustavu infiltrometra od η = 0.18, moguće je odrediti veličinu godišnjih gubitaka vode iz sustava infiltrometra.

Ti gubici vode su direktna posljedica isparivanja iz zasićene zone infiltrometra, odnosno podzemne vode.

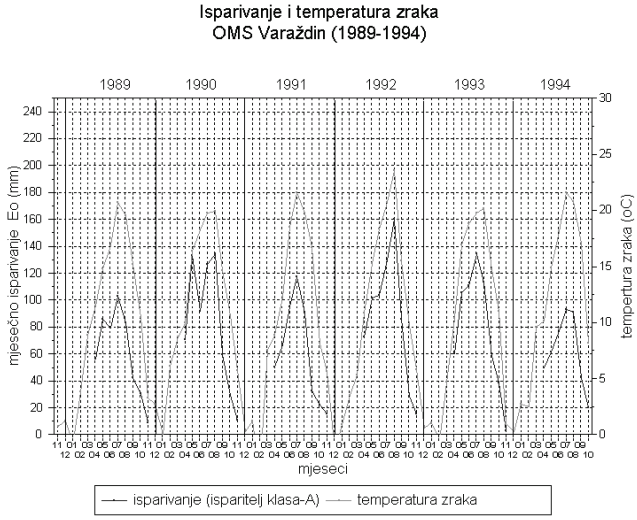
5.3. Isparivanje

Isparivanje na meteorološkoj stanici se mjeri putem isparitelja klase-A, samo u toplom djelu godine.

Rezultati mjerenja isparivanja za cjelokupno razdoblje istražnih radova prikazani su slikom 19, sa izmjerenim vrijednostima vlažnosti zraka, odnosno na slici 20 sa izmjerenim vrijednostima temperature zraka.



Slika 19. Odnos isparivanja i vlažnosti zraka

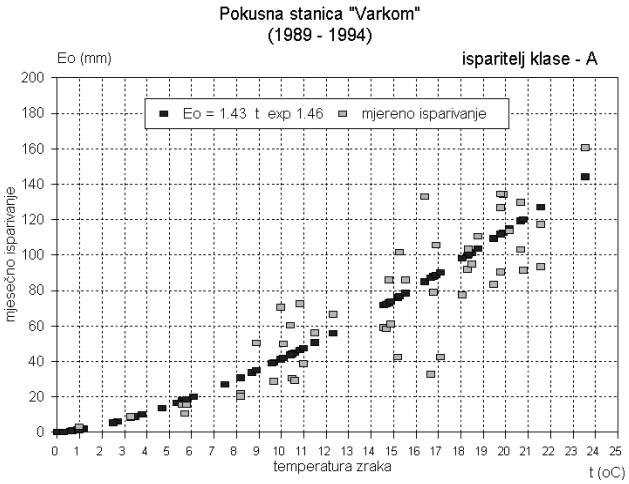


Slika 20. Odnos isparivanja i temperature zraka

Korelacijska veza evaporacije isparitelja klase-A sa srednjom mjesečnom temperaturom zraka t (^{0}C), proračunata je za šest godišnje razdoblje istražnih radova (1989 – 1994).

Korelacijska veza uspostavljena je nelinearnim korelacijskim odnosom $E_0 = f(t)$, prikazanim na slici 21 sa vrlo visokim koeficijentom korelacije (r = 0.90) te slijedećim parametrima funkcije:

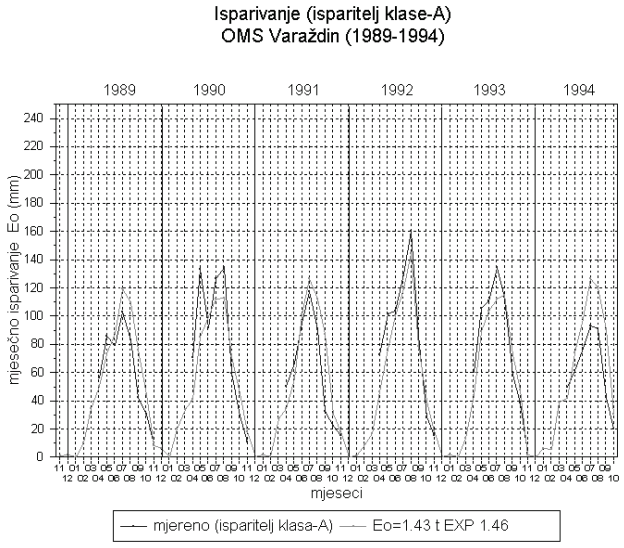
$$E_0 = 1,43\, t^{1,46} \qquad (6)$$



Slika 21. Isparitelj klase A

Prilagodba računskog isparavanja E_0 iz jednadžbe (6) na stvarno isparivanje izmjereno na isparitelju klase-A na meteorološkoj stanici OMS „Varaždin“, grafički je prikazana na slici 22, iz razdoblja provedenih istražnih radova na mjernoj stanici „Varkom“.

Tokom hladnog dijela godine nema mjerenja isparivanja na isparitelju klase-A, pa se mogu zbog dobre korelacije koristiti proračunata isparivanja preko korelacijske funkcije (6). Takvi podaci su bili korišteni u analizi isparivanja na pokusnoj stanici „Varkom“ u razdoblju (studeni – ožujak).



Slika 22. Računsko i stvarno isparavanje

6. IDENTIFIKACIJA HIDROLOŠKOG SUSTAVA

Analiza ulaznih i izlaznih parametra sustava provedena je u cilju određivanja nelinearnog racionalnog modela koji će opisivati navedena dva hidrološka procesa (stvarnu evapotranspiraciju ET_a i efektivnu infiltraciju I_e) za sustav infiltrometra sa dubinom podzemne vode na 200 cm.

U sustavu se uspostavlja stabilizirano stanje gibanja vode. Uspostavljeni sustav infiltrometra mjerne stanice „Varkom" predstavlja zatvoreni hidrološki sustav, kao dio hidrološkog ciklusa.

Izvršena je analiza rezultata mjerenja za mjesečne vrijednosti u šest - godišnjem vremenskom razdoblju istražnih radova. Opća jednadžba vertikalne vodne bilance za sustav infiltrometara se može izraziti kao:

$$P = I_e + ET_a \tag{7}$$

gdje su:

P – izmjerena mjesečna oborina, kao prirodni ulazni parametar u sustav

I_e – izmjerena mjesečna efektivna infiltracija, kod stalne dubine podzemne vode u sustavu na 200 cm

ET_a – ukupni mjesečni gubitak vode u sustavu, koji obuhvaća sva isparavanja vode iz sustava kod dubine podzemne vode na 200 cm (aktualna evapotranspiracija).

Svi prikazani podaci predstavljaju sintezu provedenih istraživanja na infiltrometarskoj stanici „Varkom" tokom šest hidroloških godina istraživanja, te su pregledno grafički prikazani na navedenim slikama.

6.1. Definiranje modela aktualne evapotranspiracije

Prilikom bilanciranja vode u hidrologiji se koriste tri pojma gubitka vode uslijed isparivanja:

- Evaporacija E_o je gubitak vode sa vodene površine ili vodom zasićenog zemljišta.
- Potencijalna evapotranspiracija ET_p definirana je Thorntwaitovom definicijom i odgovara stanju vlažnosti zemljišta u idealnim uvjetima.
- Aktualna evapotranspiracija ET_a je stvarni gubitak vode iz zemljišta u prirodnim uvjetima.

Potencijalna evapotranspiracija ET_p uvažava idealne uvjete stanja vlažnosti sustava. Procjena procesa evapotranspiracije u sušnom dijelu godine sa malim oborinama nije pogodna za bilanciranje voda jer se u proračune mogu unijeti znatne pogreške.

Kako bi se mogao odvijati proces evapotranspiracije u sustavu moraju biti ispunjene dvije osnovne fizičke pretpostavke:

- Mora postojati prisutnost vlažnosti u sustavu (uvjet u funkciji oborine)
- Mora postojati prisutnost energije u sustavu (uvjet u funkciji temperature zraka)

Uvažavajući ta dva uvjeta istovremeno, moguće je odrediti model aktualne evapotranspiracije ET_a sustava, koji uvažava stvarne gubitke vode u prirodnim uvjetima. Prihvaćajući opću jednadžbu vertikalne vodne bilance (7) i sve navedene pretpostavke hidrološkog sustava, moguće je odrediti stvarne gubitke vode u vertikalnoj vodnoj bilanci koji su uzrokovani evapotranspiracijom.

U sušnim razdobljima godine kada su male oborine i visoka temperatura zraka, isparavanje je malo u apsolutnim vrijednostima, ali u postocima je veliko u odnosu na oborinu. Obrnuto je u hladnijem djelu godine sa većim količinama oborina. Isparivanje je tada u apsolutnim vrijednostima veće, ali malo u odnosu na oborinu, Hrvatske vode (1994).

Zbog toga se uvode bezdimenzionalni parametri u opću jednadžbu (7) vertikalne vodne bilance sustava kao:

- mjesečni koeficijent isparivanja e
- mjesečni koeficijent infiltracije f

odnosno:

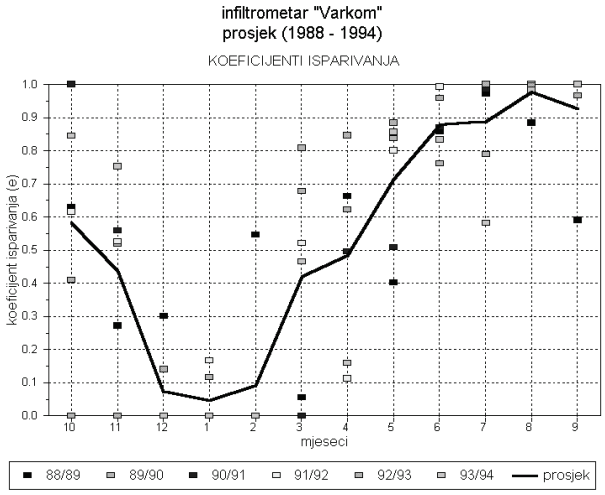
$$e = 1 - f \tag{8}$$

gdje su:

$$e = \frac{ET_a}{P} \tag{9}$$

$$f = \frac{I_e}{P} \tag{10}$$

Uvedeni koeficijent isparivanja *e* analizirao se je za razdoblje istražnih radova (1988 – 1994), te se njegov karakteristični raspored tokom godine može uočiti na slici 23.



Slika 23. Koeficijent isparivanja e

Dovodeći koeficijent isparivanja *e* u funkcijski odnos sa srednjom mjesečnom temperaturom zraka *t*, za cjelokupno razdoblje istražnih radova na sustavu infiltrometra sa 200 cm dubine podzemne vode, uspostavila se njihova korelacijska zavisnost oblika $e = f(t)$. Uočena je dosta čvrsta nelinearna korelacija oblika:

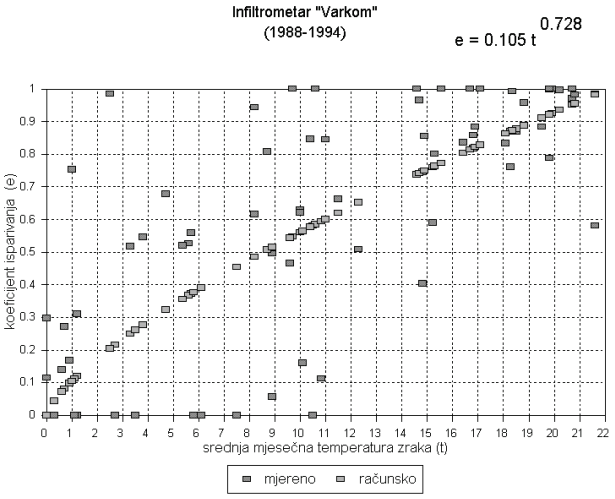
$$e = wt^n \tag{11}$$

Parametri funkcije su određeni Gaussovom metodom minimalizacije veličinama:

- $w = 0.105$
- $n = 0.728$

uz koeficijent korelacije $r = 0.71$ što ukazuje na značajnu povezanost koeficijenta isparivanja *e* sa temperaturom zraka *t* u mjesečnim relacijama.

Grafički prikaz funkcije vidljiv je na slici 24.



Slika 24. Prikaz funkcije korelacijske ovisnosti - (6)

Uvažavajući dva osnovna preduvjeta za vlažnost i energiju dobiven je model za određivanje aktualne evapotranspiracije ET_a hidrološkog sustava, na infiltrometarskoj stanici „Varkom“:

$$ET_a = P \cdot e \tag{12}$$

$$ET_a = w \cdot P \cdot t^n \tag{13}$$

Odnosno uvrštavanjem proračunatih parametara u jednadžbu (13):

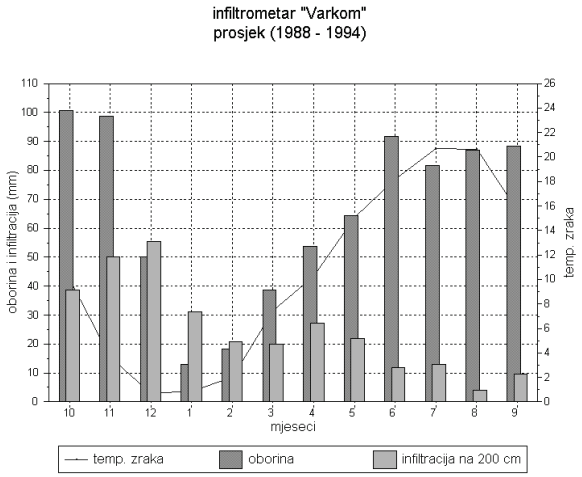
$$ET_a = 0.105\, P \cdot t^{0.728} \tag{14}$$

Model je vrlo prikladan za korištenje u svakodnevnoj hidrološkoj praksi za određivanje aktualne evapotranspiracije sa prirodno travnatih tla bez agrokulturnih zahvata. Potrebno je poznavanje samo podataka o količini mjesečnih oborina *P* i srednjih mjesečnih temperatura zraka *t,* na prostoru za koji se želi odrediti veličina aktualne mjesečne evapotranspiracije u cilju bilanciranja voda.

6.2. Definiranje modela efektivne infiltracije

Efektivna infiltracija je izlazni parametar u vodnoj bilanci infiltrometara. Prihranjivanjem sustava infiltrometara gravitacijskom vodom od oborine *P*, rezultira mjerenom efektivnom infiltracijom I_e u sustavu.

Rezultati analize mjerenih vrijednosti (oborina, temperatura, infiltracija) na sustavu infiltrometra „Varkom“, sa dubinom podzemne vode 200 cm, iz razdoblje istražnih radova (1988/89–1993/94) prikazani su grafički na slici 25.



Slika 25. Izmjerene vrijednosti na sustavu infiltrometra „Varkom“

Proces efektivne infiltracije I_e utječe na promjenu granice između zasićene i prozračne zone sustava, odnosno uzrokuje povišenje nivoa podzemne vode u sustavu, te predstavlja prihranjivanje zasićene zone oborinskom vodom iz atmosfere.

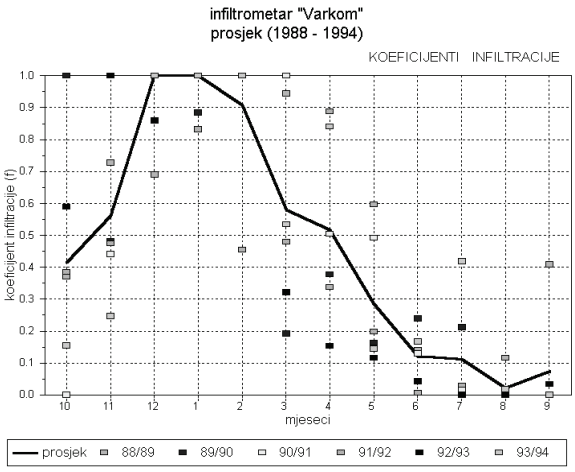
U hidrološkom sustavu infiltrometara na mjernoj stanici "Varkom" kod odabranog radnog nivoa podzemne

vode, nema mogućnosti prirodnog povišenja toga nivoa. Prihranjivanje sistema infiltrometara gravitacijskom vodom od oborine P, rezultira izmjerenom efektivnom infiltracijom I_e u sustavu. Uz uvažavanje svih pretpostavki koje su postavljene prilikom analize vodne bilance sustava infiltrometara, te prihvaćanjem valjanosti opće jednadžbe vertikalne vodne bilance (7) za sustav, kao i izvedene jednadžbe vertikalne bilance (8), moguće je definirati koeficijente infiltracije f za cijelo razdoblje istražnih radova od šest hidroloških godina.

Prilikom proračuna koeficijenata infiltracije, osim direktno izmjerene efektivne infiltracije na mjeraču infiltrometra, uzeta je u proračun i indirektno količina efektivne infiltracije na bazi mjerenog podizanja nivoa vode u pijezometru sustava, nakon ljetnog razdoblja godine (listopad-prosinac). Takva infiltracija nije izmjerena u posudi mjerača stanice, jer je uzrokovala prirodno podizanje nivoa podzemne vode do radnog nivoa u sustavu infiltrometra.

Rezultati proračuna koeficijenta infiltracije za cjelokupno razdoblje istražnih radova pokusne stanice „Varkom“ prikazan je u grafičkom obliku slikom 26.

Očita pravilnost rasporeda koeficijenta infiltracije tokom godine ukazuje na mogućnost određivanja modela efektivne infiltracije sustava putem modificirane jednadžbe vertikalne vodne bilance (8).



Slika 26. Koeficijent infiltracije f

Konačni model određivanja ukupne mjesečne efektivne infiltracije hidrološkog sustava vertikalne vodne bilance aluvija rijeke Drave ima slijedeći oblik, MZT (1996):

$$f = 1 - e \tag{15}$$

$$f = 1 - wt^n \tag{16}$$

odnosno nakon supstitucije sa oborinom P dobije se model efektivne infiltracije u obliku:

$$I_e = P(1 - wt^n) \tag{17}$$

odnosno, za ukupne mjesečne vrijednosti efektivne infiltracije na aluvijalnom tlu sjevero-zapadne Hrvatske izrazom:

$$I_e = P\left(1 - 0{,}105\, t^{0.728}\right) \tag{18}$$

Ovakav dobiveni model infiltracije vezan je uz opću jednadžbu vertikalne vodne bilance (7).

7. ZAKLJUČAK

Za potrebe proračunavanja režima podzemnih voda važno mjesto uzimaju vertikalni procesi u hidrološkom ciklusu, kao dominantni. Glavni čimbenici koji utječu na režim podzemnih voda su:

- Klimatološki
- Hidrološki
- Hidrogeološki
- Biološki.

Ulazni parametri u sustav, koji se kontinuirano mjere na mjernoj stanici „Varkom“ su osnovni klimatološki parametri, zastupljeni oborinama i temperaturom zraka. Osnovni klimatološki parametri izmjereni na pokusnoj stanici „Varkom“ vrlo su slični izmjerenim parametrima na meteorološkoj stanici OMS Varaždin.

Koeficijent korelacije iznosi za oborine $r = 0.89$, dok je za temperaturu zraka $r = 0.99$. Izlazni parametri sustava predstavljeni su rezultatima mjerenja promjene nivoa u pijezometrima sistema, efektivne infiltracije i gubitka vode iz sustava uslijed isparivanja. Šestogodišnjim istražnim radovima na hidrološkom sustavu „Varkom“ analizirani su isparivanje (evapotranspiracija) i infiltracija kao glavni elementi vertikalne vodne bilance. Analiza sustava je provedena u cilju određivanja nelinearnog regresijskog modela, koji zadovoljavajuće opisuje oba hidrološka procesa, za sustav infiltrometra sa dubinom podzemne vode na 200 cm i to:

- Stvarna evapotranspiracija ET_a (mm)
- Efektivna infiltracija I_e (mm)

Analizom i sintezom rezultata mjerenja dobiven je matematički model VARKOM za određivanje efektivne infiltracije I_e hidrološkog sustava na mjernoj stanici „Varkom“.

Uvođenjem koeficijenta isparivanja i koeficijenta infiltracije u opću jednadžbu vertikalne vodne bilance, dobio se konačni model koji definira ukupnu mjesečnu efektivnu infiltraciju, hidrološkog sustava, kao dio vertikalne vodne bilance riječnog aluvija između rijeke Plitvice i Drave.

Model se može koristiti za prostore koji odgovaraju sličnom hidrogeološkom i biološkom stanju sustava na aluviju rijeke Drave u sjeverozapadnoj Hrvatskoj.

8. LITERATURA

Bodman G B, Colman E. A. (1944) Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils. Soil Sci Soc Am J 8:116 -122.

Chow V T, Maidment D R, Mays L W (1988) Applied hydrology. McGraw-Hill, New York.

Fleming G (1975) Computer simulation techniques in hydrology. Elsevier, New York.

Hrvatske vode (1994) Hidrološki istražni radovi na eksperimentalnoj stanici, infiltrometru – Varaždin u razdoblju od 1988. do 1994. godine – izvješća.

McCuen R H (1989) Hydrologic analysis and design. Prentice-Hall, New Jersey.

Ministarstvo znanosti i tehnologije Republike Hrvatske (MZT) (1996) Znanstveni projekt (2-11-006) „Vertikalna bilanca podzemnih voda riječnog aluvija“ (1991. – 1996.).

Pandžić K, Trninić D, Likso T, Bošnjak, T (2009) Long-term variations in water balance components for Croatia. Theor and Appl Clim 95: 39-51.

Phoon K, Tan T, Chong, P (2007) Numerical simulation of Richards equation in partially saturated porous media: under-relaxation and mass balance. Geot and Geol Eng 25:525-541.