

POBOLJŠANJE VODOSNABDEVANJA I SMANJENJE BROJA KVAROVA POMOĆU HIDRAULIČKOG MODELIRANJA

IMPROVING RELIABILITY OF WATER SUPPLY AND REDUCING THE NUMBER OF FAILURES THROUGH HYDRAULIC MODELING

MARINA NIKOLIĆ¹
GORAN JOVANOVIĆ²

Stručni rad
DOI: 10.5937/GV25119N

Rezime: Cilj svakog vodovodnog preduzeća je smanjenje gubitaka, koji predstavljaju količinu vode koja se proizvede i potisne u sistem a ne naplati. U ovom radu je posebna pažnja posvećena smanjenju gubitka pre svega kroz smanjenje troškova za popravke kvarova, kao i poboljšanju zadovoljstva korisnika, kroz obezbeđenje neprekidnog snabdevanja vodom u zahtevanim pritiscima u mreži. Opisan je uzrok nedostatka vode, kao i postojeća ograničenja rada vodovodnog sistema u naselju Barajevo. Predstavljena je kalibracija hidrauličkog modela oblasti Sremčica kroz koju prolaze tranzitni cevovodi i dati su predlozi za unapređenje rada sistema. Već prilikom kalibracije mogu se uočiti nedostaci sistema, kao što su neadekvatni prečnici cevi zbog čega dolazi do visokih pritisaka u mreži i sl. Precizno kalibrisan model pruža mogućnost pronalaženja varijantnih rešenja za otklanjanje nedostataka u sistemu. Sve ovo ne bi bilo moguće bez tačnih podataka o mreži (prečnik, materijal i godište cevovoda, cevne veze, zapremine i kote preliva rezervoara, nadmorske visine čvorova i sl), dovoljnog broja merenja i dobrog poznavanja rada sistema, poput uslova pojedinih podešavanja rada pumpi i rezervoara i sl.

Ključne reči: smanjenje gubitaka, hidraulički model, varijantna rešenja

Abstract: The goal of every water company is to reduce losses, which imply to the amount of water that is produced and pushed into the distributing system, but not charged for. In this paper, special attention is devoted to loss reduction, primarily by reducing the costs for repairing system failures, as well as improving the user satisfaction level by ensuring a continuous supply of water at the required pressure in the system. The cause of the lack of water is described, as well as the existing limitations of the water supply system in the settlement of Barajevo. The calibration of the hydraulic model of the network within the area of Sremčica, through which the transit pipelines pass, is presented, and suggestions for improvi-

¹ Marina Nikolić, JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija“, Kneza Miloša 27, Beograd, marina.nikolic@bvk.rs, ORCID: 0009-0005-4419-8594

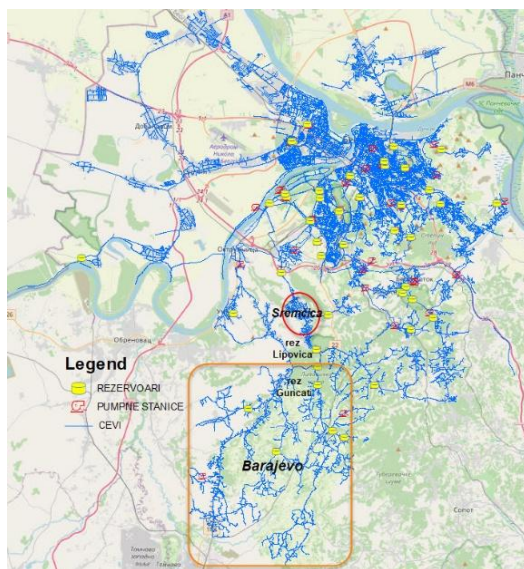
² Goran Jovanović, JKP „Beogradski vodovod i kanalizacija“, Kneza Miloša 27, Beograd, goran.jovanovic@bvk.rs, ORCID: 0009-0004-5867-3440

ng the operation of the system are made accordingly. Already during the process of calibration, system deficiencies could be detected, such as inadequate pipe diameters that resulting in high pressures in the network, etc. Properly calibrated model represents a valuable tool that enables identification of the alternatives for correcting the deficiencies. All this would not be possible without accurate data about the network (diameter, material and year of installation of pipelines, pipe connections, tank volumes and overflows, elevations of nodes, etc.), a sufficient number of measurements and a good knowledge of the operation of the system, such as the conditions of certain pump and tank settings, etc.

Key words: water loss reduction, hydraulic model, variant solutions

1. Uvod

JKP Beogradski vodovod i kanalizacija se već godinama suočava sa problemom vodosnabdevanja u naselju Barajevo tokom letnjih meseci. Oblast Barajevo (označena narandžastom bojom na slici 1) obuhvata više naselja čiji ukupni dotok iznosi 2% ukupno potisnute količine vode u Beogradskom vodovodnom sistemu (BVS). Zbog velike sezone neravnomernosti potrošnje, ova oblast predstavlja veliki izazov za obezbeđenje redovnog snabdevanja vodom. Razlog je nedovoljna količina vode u rezervoaru „Lipovica“, odakle se voda pumpa ka naselju Barajevo. Postojeći kapaciteti i uslovi rada onemogućuju veći dotok vode u rezervoar „Lipovica“. Pokušaj povećanja dotoka u rezervoar „Lipovica“ dovodi do povećanja broja kvarova u naselju Sremčica (označeno crvenom bojom na slici 1).

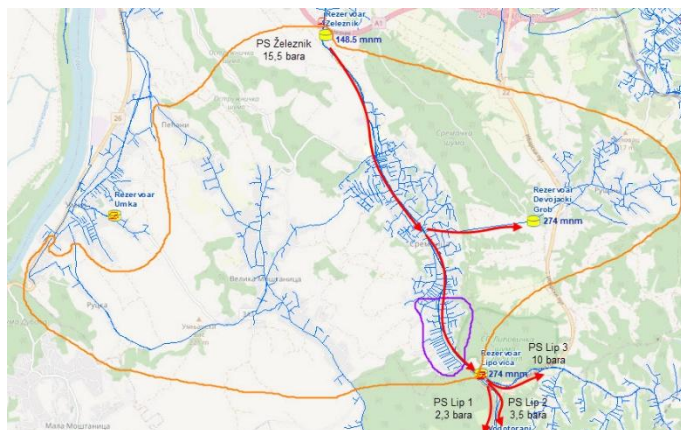


Slika 1. Lokacija predmetne oblasti u Beogradskom vodovodnom sistemu (BVS). Narandžasta boja označava oblast Barajevo, a crvena naselje Sremčica

Zbog toga se uvode razne mere za kontrolisanje potisa iz rezervoara „Lipovica“ ka Barajevu, među kojima su i restrikcije vode koje utiču loše na kvalitet usluge i zadovoljstvo potrošača. Kako bi se utvrdile mogućnosti za dopremanje veće količine vode u rezervoar „Lipovica“, neophodno je formirati hidraulički model oblasti Sremčica, kroz koju prolaze tranzitni cevovodi ka rezervoaru „Lipovica“. Precizno kalibrisan hidraulički model može pružiti mogućnost analize varijantnih rešenja, i odabir najboljeg.

2. Karakteristike razmatrane oblasti i analiza potreba za vodom

Rezervoar „Lipovica“ se snabdeva potisnim cevovodom PS „Železnik“, koji uzima vodu sa potisa PS „Makiš 2“ i iz rezervoara „Železnik“. Potis PS „Železnik“ se sastoji iz 2 cevovoda Ø500 koja se spajaju u cevovod Ø700 kod ulice Jeličićev venac u Sremčici. Na istom mestu se odvaja i Ø250 koja puni rezervoar „Devojački grob“. Iz rezervoara „Lipovica“, voda se potiskuje u tri pravca: potis PS „Lipovica 1“ ka Barajevu, PS „Lipovica 2“ ka vodotornju „Lipovica“ i PS „Lipovica 3“ ka Ripnju. Sva tri potisa imaju po tri grupe pumpi i potiskuju vodu sa različitim pritiscima. Na slici broj 2 je narandžastom bojom predstavljena razmatrana oblast sa svim potisima pumpnih stanica.



Slika 2. Prikaz razmatrane oblasti: oblast za koju se razvija model (ograničena narandžastom linijom), i deo mreže koji pripada potisu PS „Lipovica 1“ (ograničen ljubičastom linijom)

Problemi sa vodosnabdevanjem nastaju u samom naselju Barajevo. U trenucima povećane potrošnje kada nivo u rezervoaru Lipovica padne na 1 m, potrebno je primeniti neku od mera restrikcije vode kako bi se sprečio dalji pad nivoa vode i ulazak vazduha u pumpe. Primenuju se dve mere restrikcije: smanjenje pritiska na potisu PS „Lipovica 1“ ka Barajevu (sa 2,3 bara na 1.9 bara) ili isključivanje jedne

pumpe na tom potisu. Sve mere se uvek uvode na potis ka Barajevu jer je znatno veći od preostala dva, iako je kompletan potis suočen sa istim problemom. Obe mere restrikcije najviše ugrožavaju potrošače na najvišim kotama i koji se snabdevaju iz rezervoara „Guncati“. Rezervoar „Guncati“ je na najvišoj koti i funkcioniše kao kontrarezervoar.

Problem nedovoljne količine vode u samom Barajevu je posledica nemogućnosti pojačanog punjenja rezervoara (REZ) „Lipovica“. PS „Železnik“ pumpa vodu iz prve u treću visinsku zonu, tačnije sa kote terena od 145 mnm do 274 mnm. Potis, koji se sastoji od dve Ø500, prolazi kroz naselje Sremčica, gde su pretežno azbestno-cementne cevi. Ove dve cevi se spajaju u jednu Ø700 kod ulice Jeličićev venac (skretanje za rez. Devojački grob) i ona potiskuje vodu sve do REZ „Lipovica“ (slika 2).

PS „Železnik“ u periodu smanjene potrošnje radi sa pritiskom od 13,5 bara, ali tokom povećane potrošnje dostiže i pritisak od 15,5 bara. Tada je protok na izlazu 380 L/s i nije moguće postići veći protok jer već i pri tolikom pritisku dolazi do povećanja broja kvarova u naselju Sremčica. Naselje Sremčica pripada rejonu Čukarica 2, i pregled broja kvarova u ovom rejonu i celom sistemu je prikazan u tabeli 1. Rejon Čukarica 2 obuhvata mrežu dužine 270 km, dok ceo sistem BVS ima 4150 km. Tabela 1 prikazuje kvarove u periodu jun-septembar, kada se javlja najveći broj kvarova tokom godine. Može se primetiti da je znatno veći u posmatranoj oblasti u odnosu na ceo sistem.

Tabela 1. Prikaz kvarova u Rejonu Čukarica 2 i celom sistemu BVS

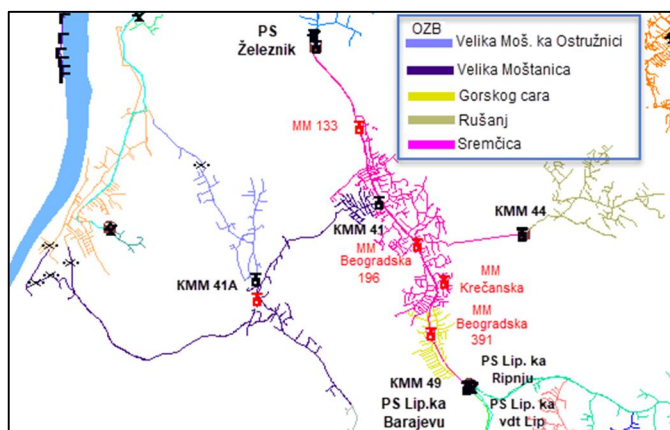
mesec 2024.	broj kvarova		broj kvarova po km mreže	
	Čukarica 2	ceo sistem	Čukarica 2	ceo sistem
jun	211	1958	0.78	0.47
jul	290	2685	1.07	0.64
avgust	344	2863	1.27	0.68
septembar	235	2743	0.87	0.66
prosek	270	2562.25	1	0.61

Na slici broj 2 se može videti oblast za koju je urađena hidraulička analiza (označena narandžastom bojom). Ljubičastom bojom je označen deo mreže koji ne pripada potisu PS „Železnik“ već potisu PS „Lipovica 1“ ka Barajevu ali se teritorijalno nalazi u posmatranoj oblasti, tako da je uključena u hidrauličke analize u ovom radu.

Oblast pripada trećoj visinskoj zoni sa kotama terena od 95 mnm do 274 mnm. Posедуje i 4 regulatora pritiska kako bi se redukovao pritisak u pojedinim delovima.

Rad PS „Železnik“ određuje isključivo REZ „Lipovica“, dok se punjenje REZ „Devojački grob“ kontroliše zatvaračima u skladu sa tim. Rezervoar „Lipovica“ se sastoji od dva rezervoara, starog i novog, ukupne zapremine 8000 m³ ali je korisna zapremina 7157 m³ jer je novi rezervoar ukopan 0,8 m u odnosu na stari, i ta količina vode se ne može iskoristiti. REZ „Devojački grob“ je zapremine 2.000 m³. Ukupna dužina mreže u posmatranoj oblasti je 131 km.

Sve pumpe i rezervoari su pokriveni stalnim mernim mestima u kojima se meri protok i pritisak, ukupno njih 4. Pored njih postoje još 4 stalna mesta i svi zajedno formiraju 5 osnovnih zona bilansa (OZB). Na slici 3 je prikazana šema svih OZB. Crnom bojom su označena stalna merna mesta i u njima se mere i protok i pritisak, a crvenom privremena u kojima je izmeren samo pritisak. Stalna merna mesta formiraju OZB i koriste se za praćenje gubitaka u sistemu, dok privremena ne formiraju OZB, ali su u ovom radu iskorišćena za određivanje gubitaka pritiska duž cevovoda. Postoje i dva merna mesta na SCADA za merenje nivoa vode u rezervoarima „Lipovica“ i „Devojački grob“. Na osnovu merenja protoka u svim mernim mestima određene su potrošnje po OZB kao i njihove krive i tako je raspoređena potrošnja u modelu za dan 23-24.7.2024.



Slika 3. Osnovne zone bilansiranja (OZB) i merna mesta u posmatranoj oblasti. Crni markeri označavaju stalna merna mesta za protoki pritisak, a crveni merna mesta za pritisak.

U tabeli 2 su prikazane OZB-a i merna mesta koja ih formiraju (tzv. granična merna mesta). Znak +/- označava smer vode, odnosno da li merno mesto predstavlja ulaz (+) ili izlaz iz zone (-). Dat je i ukupan gubitak u svim OZB sračunat na osnovu razlike ukupnog dotoka i fakturisane količine vode u georeferenciranim vodomerima svake OZB. Može se primetiti da je izrazito povećan u zonama na potisu pumpnih stanica dok je manji na gravitacionom snabdevanju iz rezervoara „Rušanj“.

Tabela 2. Osnovne zone bilansa (OZB) u posmatranoj oblasti sa graničnim mernim uređajima i ukupnih gubitkom

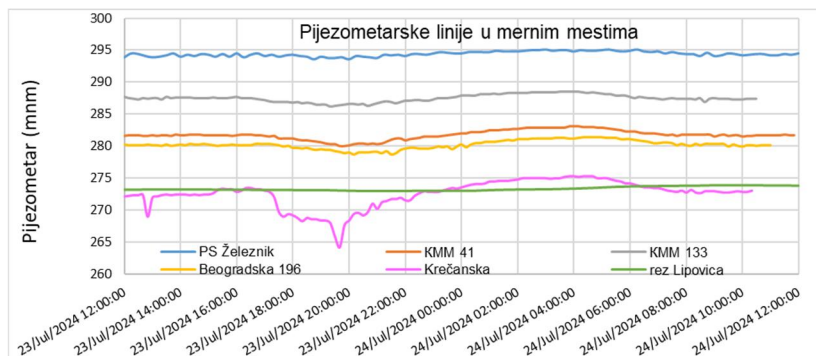
Naziv OZB	Granični merni uređaji			Ukupan gubitak (%)
Velika Moštanica ka Ost.	+KMM 41A			41,5
Velika Moštanica	-KMM 41A	+KMM 41		60,2
Gorskog cara	+KMM 49			52,9
Rušanj	+KMM 44			7,2
Sremčica	+PS Železnik	-PS Lip. ka Ripnju	-PS Lip. ka VDT Lip.	50,8
	-PS Lip.ka Barajevu	-KMM 41	-KMM 44	

3. Kalibracija hidrauličkog modela

Kalibracija je izvršena u softveru koji se bazira na EPAnetu [1] uz poštovanje osnovnih pravila izrade matematičkih modela [2].

Smatra se da je model dobro kalibrisan kada se dobiju vrednosti protoka i pritiska u modelu koje odgovaraju vrednostima izmerenim na terenu ili očitanim na SCADA sistemu sa odstupanjem ne većim od 1%. Prilikom kalibracije modela potrebno je utvrditi gubitke pritiska u cevovodima i usvojena je metoda podešavanja apsolutne hrapavosti u cevovodima u skladu sa padom pritiska na posmatranoj deonici. Na ovaj način, sve gubitke u cevovodu, linijske i lokalne, svodimo na linijske. Na osnovu prethodnih kalibracija za mrežu sličnih karakteristika [3], polazi se od pretpostavljenih vrednosti koef. hrapavosti. Mreža sličnih karakteristika podrazumeva isti izvor snabdevanja, odnosno isto postrojenje za pripremu vode za piće, kao i istu starost cevovoda. Za najstarije cevovode (starosti od 60 i više godina) usvaja se početna hrapavost od 5 mm, a dok se za ostale cevovode usvaja vrednost srazmerna njihovoj starosti. Zatim se vrši korekcija početnih vrednosti apsolutne hrapavosti dok se ne dobije očekivana vrednost protoka i pritiska u mernim mestima.

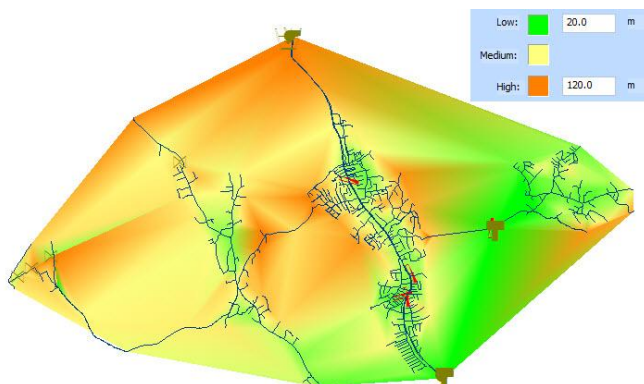
U našem slučaju, najbitnije je bilo precizno podesiti apsolutnu hrapavost u cevovodima Ø500 i Ø700 kojima se puni REZ „Lipovica“, jer je cilj povećanje dotoka u rezervoar. Ciljana su merenja pritiska u mernim mestima: KMM 133, KMM 41, MM Beogradska 196, MM Krečanska i nivo u REZ „Lipovica“. Sva merna mesta su na tranzitnim cevovodima, osim MM Krečanska koje je na sekundarnoj mreži (slika 3). Oba tranzitna cevovoda Ø 500 su dužine 5 km, dok je cevovod Č 700 dužine 3,2 km. Na slici 4 su prikazane pijeziometarske linije u prethodno navedenim mernim mestima.



Slika 4. Pijezometri u mernim mestima

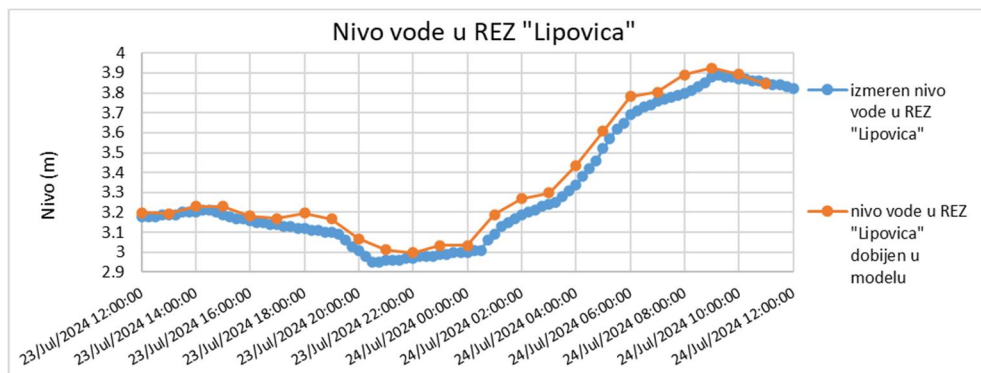
Na osnovu dosadašnjih rezultata zaključeno je da u BVS-u nema cevovoda apsolutne hrapavosti veće od 20 mm. Ukoliko se ispostavi da je dobijena vrednost hrapavosti nelogična, uglavnom izuzetno veća od pretpostavljene, sumnja se da je u pitanju veći lokalni gubitak. U najvećem broju slučajeva se veći gubici mogu objasniti nepotpuno otvorenim zatvaračima. Ovo je najbitnije odrediti u primarnim cevovodima jer to utiče na pritiske u celom području, i može se desiti da su različiti koeficijenti hrapavosti u cevovodima iste starosti.

Tačne vrednosti pijezometarskih linija u preostalim tačkama su postigute sledećim podešavanjem apsolutne hrapavosti (Colebrook-White roughness height): u cevovodu Č 500 iz 1961. godine je 10 mm, cevovod DL 500 iz 2000. godine ima hrapavost 2 mm, dok je cevovod Č 700 iz 1961. godine podešen na hrapavost od 46 mm. Zaključak je da u cevovodu Č Ø700 postoji znatni lokalni gubitak koji dodatno otežava punjenje REZ „Lipovica“. MM Krečanska, pokazuje znatni pad pijezometra. Pretpostavlja se da postoji veći lokalni gubitak na cevovodu Ø150 sa koga se snabdeva. Na slici 5 su prikazani pritisci u hidrauličkom modelu posmatrane oblasti.



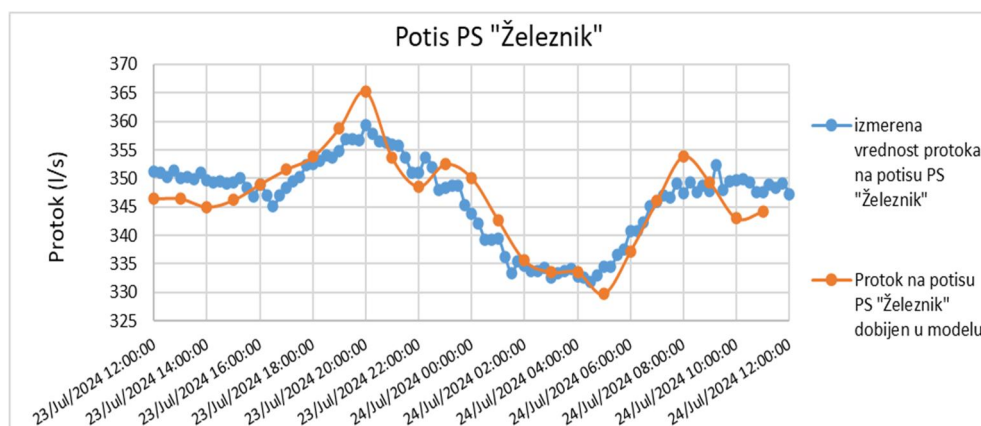
Slika 5. Pritisci posmatrane oblasti u hidrauličkom modelu

Slika 6 pokazuje izmerenu vrednost nivoa vode u REZ „Lipovica“ i vrednost dobijenu u modelu.



Slika 6. Nivo vode u REZ „Lipovica“

Konačna provera kalibrisanog modela, odnosno validacija modela, vrši se poređenjem protoka na potisu PS „Železnik“ u modelu i odgovarajuće vrednosti koja je očitana na mernom uređaju. Na slici 7 su izmerena vrednost protoka na potisu PS „Železnik“ i vrednost dobijena u modelu.



Slika 7. Izmeren protok na potisu PS „Železnik“ i vrednost protoka dobijena u modelu

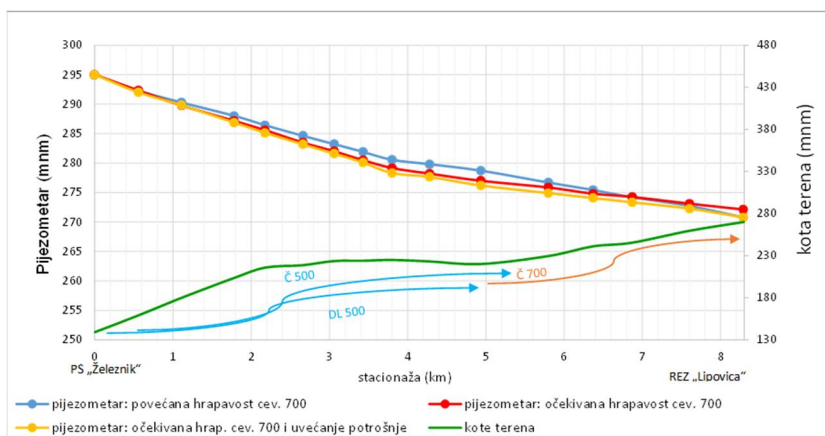
4. Predlozi za obezbeđenje potrebne količine vode

Zadatak je bio odrediti uzrok smanjenja propusnosti cevovoda Č 700 kao i mogućnost povećanja količine vode na potisu PS „Lipovica 1“ bez daljeg povećanja pritiska na potisu PS „Železnik“.

5. Predlog broj 1 – Otkrivanje i otklanjanje uzroka „prigušenja“ cevovoda Č 700

Ako se pretpostavi da je hrapavost cevovoda Č 700 identična hrapavosti cevovoda Č 500, budući da su izgrađeni u isto vreme, a to je 10 mm, dobija se da je moguće potisnuti dodatnih 31 L/s iz REZ „Lipovica“. Do ove vrednosti se dolazi fiksiranjem pritiska na potisu PS „Železnik“ i maksimalnim mogućim povećanjem potrošnje na potisu PS „Lipovica 1“ tako da na kraju intervala nivo u REZ „Lipovica“ bude isti kao pre povećanja potrošnje. U našem slučaju je to 3,8 m.

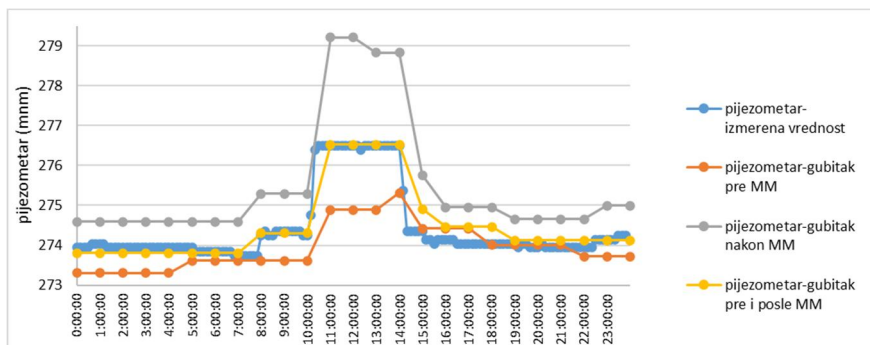
Na slici 8 su prikazani pijeometri u 20.00 h pri maksimalnom protoku, označeni:



Slika 8. Pijeziometrijske linije duž cele trase potisnih cevovoda

Na slici 8 se može primetiti da razlike pijeziometara iznose manje od 2 m, pa je potrebno izvršiti dodatna merenja kako bi se bliže odredila lokacija gubitka pritiska.

Izvršena su dodatna merenja uz uspostavljanje još jednog mernog mesta pod nazivom Beogradska 391 (slika 3). Merenja su izvršena u martu 2025. kada je potrošnja smanjena tako da je pritisak na potisu PS „Železnik“ povećan na 15.3 bara kako bi se razvio što veći protok na punjenju REZ „Lipovica“. Veći protok bi pokazao veći pad pritiska i bliže odredio njegovu lokaciju. Model je ponovo kalibrisan za dan 17.03.2025. i pretpostavljeno je „prigušenje“ cevovoda Č 700 pre, posle, kao i pre i posle mernog mesta Beogradska 391 da bi se utvrdila njegova lokacija. Prigušenje, odnosno lokalni gubitak pritiska, se u modelu simulira kao deo cevovoda smanjenog prečnika koji bi doveo do identičnog smanjenja propusne moći cevovoda. U praksi je to najčešće nepotpuno otvoren zatvarač ali može biti i neki drugi uzrok. Dobijeni pijeometri za sve situacije su prikazani na slici 9. Zaključak je da se „prigušenje“ javlja i pre i posle mernog mesta.

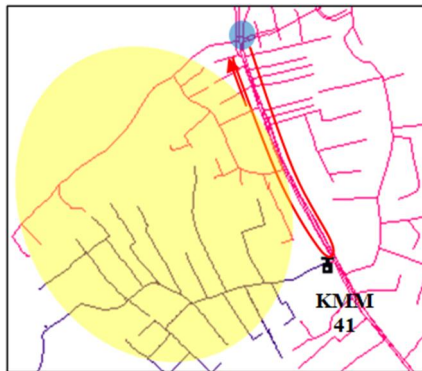


Slika 9. Promena simulirane pijeziometarske kote na MM Beogradska 391 17.03.2025. u različitim varijantama proračuna

Nastavlja se akcija lociranja ovih gubitaka uz paralelno traženje novih načina obezbeđenja veće količine vode ka REZ „Lipovica“.

6. Predlog broj 2 - Uspostavljanje nove uzvodne veze između distributivne A 250 i tranzitne DL 500

Model je pokazao da je moguće ostvariti 3 L/s više na potisu PS „Lipovica 1“ ukoliko se uradi nova veza A 250 i DL 500 na početku naselja Sremčica, označena na slici 3, kako bi se što pre „rasteretila“ DL 500. Na slici 3 žutom bojom je označen deo konzuma u naselju Sremčica koji se trenutno snabdeva preko veze A 250 i DL 500 kod mernog mesta KMM 41.



Slika 10. Nova veza između A 250 i DL 500

Na slici 10 se takođe može videti detalj označenog konzuma i trenutno snabdevanje ovih potrošača. Označena je i nova veza A 250 i DL 500 plavom bojom, uzvodno od postojeće, kojom se skraćuje putanja vode do označenih korisnika. Na ovaj način se smanjuju oscilacije pritiska u mreži zbog trenutno „dugog“ putovanja

vode. Ovom vezom se ujedno omogućava i dopremanje više vode u REZ „Lipovica“ jer će određena količina voda ranije „napustiti“ tranzitni cevovod. Predložena veza je urađena i naredne analize u modelu biće urađene sa njom.

7. Predlog broj 3 - Prenamena cevovoda A 250 i promena zona pritiska

Ispitana je mogućnost dodatnog punjenja REZ „Lipovica“ distributivnim cevovodom A 250 uz promene cevnih veza. Negativna strana ove varijante ogleda se u tome što bi pritisak kod pojedinih potrošača pao na svega 1 bar. Trenutno se cev A 250 nalazi na potisu PS „Lipovica 1“ ka Barajevu, i „vraća“ se ka Sremčici formirajući posebnu OZB pod nazivom Gorskog cara (slika broj 3). Na slici 11 je prikazan detalj OZB Gorskog cara a na slici 12 šema planiranih cevnih veza u krugu REZ „Lipovica“. Ukoliko bi A 250 postala potisni cevovod ka rezervoaru, otvaranjem označenog zatvarača (crne boje na slici 11) i prespajanjem u samom krugu REZ „Lipovica“, deo potrošača OZB Gorskog cara (označen narandžastom bojom na slici broj 11) bi ostao na potisu.



Slika 11. Šema prebacivanja potrošača



Slika 12. Detalj promene cevnih veza u krugu REZ „Lipovica“

Za ostale potrošače te OZB potrebno je izvesti novu cev dužine 0,5 km i prečnika od 150 - 200 mm, koja bi bila na potisu PS „Lipovica 1“ ka Barajevu i koja bi obezbedila zadovoljavajuću visinu pritiska. U ovom slučaju potrebno je prebaciti određeni broj priključaka sa postojeće A 250 na novopostavljenu cev i zatvoriti cev Ø150 na mestu označenom zatvaračem crvene boje na slici 11. Ova mogućnost se razmatra ukoliko se ne otkrije i ne otkloni uzrok prigušenja Č 700.

8. Zaključak

U radu je, nakon prethodno detaljnog opisa problema vodosnabdevanja naselja Barajevo, predstavljena kalibracija hidrauličkog modela oblasti Sremčica budući da se rešenje problema mora tražiti u oblasti kroz koju prolaze tranzitni cevovodi ka

REZ „Lipovica“. Rezultati modeliranja su pokazali da je neophodno utvrditi što preciznije sve karakteristike sistema kako bi se odredile mogućnosti povećanja količine vode na potisu PS „Lipovica 1“ uz poštovanje svih graničnih uslova. Osim boljeg snabdevanja naselja Barajevo vodom, cilj ovog rada je pre svega smanjenje broja kvarova u naselju Sremčica. U ovoj oblasti se već godinama beleži najveći broj kvarova u BVS. Na osnovu navedenih predloga, u JKP BVK je urađen i projekat novog tranzitnog cevovoda od PS „Železnik“ do REZ „Lipovica“ čija izgradnja trenutno nije izvesna. Zbog toga se i dalje aktivno radi na otkrivanju uzroka otežanog punjenja REZ „Lipovica“ kao i mogućnostima za njihovo otklanjanje, a osnovni preduslov za taj rad je precizan i detaljan hidraulički model.

9. Literatura

- [1] Rossman, L. A. *EPANET 2.0 User Manual*. Water Supply and Water Resources Division, National Risk management Laboratory, USEPA, Cincinnati, OH, 2000.
- [2] Ivetić M. *Računska hidraulika - Tečenje u cevima*, Građevinski fakultet, Beograd, 1996.
- [3] M. Nikolić, Optimizacija vodovodnog sistema primenom preciznog hidrauličkog modela na primeru potisa CS „Lipovica“ ka Barajevu, *Vodovodni i kanalizacioni sistemi* 162-173, 2023