

MATEMATIČKI MODEL ZA TEHNIČKO EKONOMSKU ANALIZU ZA OPTIMIZACIJU PUMPNOG GRAVITACIONOG SISTEMA VODOSNABDEVANJA

MATHEMATICAL MODEL FOR TECHNICAL ECONOMIC ANALYSIS FOR THE OPTIMIZATION OF PUMP GRAVITY WATER SUPPLY SYSTEM

GOCE TASESKI¹,
NIKOLA KRSTOVSKI²

Stručni rad
DOI: 10.5937/VIK24235T

Rezime: Nagli rast cene električne energije doveo je do potrebe da upravljanje vodovodima ima novi primarni cilj, a to je zahvatanje novih podzemnih gravitacionih izvora vode koji su na relativno većoj udaljenosti od postojećeg vodosnabdevanja sistema, kako bi se smanjile količine vode koje se dobijaju pumpanjem. Svrha ovog rada je da se razvije matematički model za tehničko-ekonomsku analizu (cost-benefit analiza) postojećeg sistema vodosnabdevanja, za koji je predviđeno zahvatanje dodatnog gravitacionog izvora vode, pri čemu će se analizom troškova izgradnje gravitacionog cevovoda i ukupnih operativnih troškova sistema kao što su: troškovi održavanja, amortizacije i električne energije odrediti optimalna količina vode koju treba zahvatiti iz budućeg gravitacionog izvora vode.

Ključne reči: kombinovani sistem vodosnabdevanja, podzemne vode, cost-benefit, optimizacija

Abstract: The rapid growth of the price of electricity has led to the need for the management of water supply systems to have a new primary goal, which is the capture of new underground gravity sources of water that are at a relatively greater distance from the existing water supply system, in order to reduce the quantities of water that are provided by pumping. The purpose of this paper is to develop a mathematical model for a technical economic analysis (cost benefit analysis) of an existing water supply system for which an additional gravity source

¹ Goce Taseski, Univerzitet Sv. Kiril i Metodij, Građevinski fakultet, Bulevar partizanskih odreda 24, Skoplje, Severna Makedonija, taseski@gf.ukim.edu.mk, ORCID: 0000-0002-4415-0321

² Nikola Krstovski, Univerzitet Sv. Kiril i Metodij, Građevinski fakultet, Bulevar partizanskih odreda 24, Skoplje, Severna Makedonija, nikolatudence@gmail.com, ORCID: 0009-0008-7602-171X

of water is foreseen, where by analyzing the construction costs of the gravity pipeline and the total operating costs of the system such as: maintenance, depreciation and electricity costs, the optimal amount of water that should be taken from the future gravity water source will be determined.

Key Words: combined water supply system, groundwater, costs - benefits, optimization

1. Uvod

Svakodnevno poskupljenje električne energije, posebno u zemljama u razvoju, ima veliki uticaj na troškove u javnim preduzećima, posebno u vodovodima gde potrebe za vodom obezbeđuju crpne stanice, gde je električna energija glavni izvor energije. Dok su rukovodioci javnih preduzeća u trci da pronađu gravitacione izvore vode koji su na većoj udaljenosti od naseljenog mesta, i dok je uvek sa ekonomske tačke gledišta uslov da se uz minimalnu cenu ostvare maksimalna korist inženjeri su prinuđeni da ispune ove uslove vodeći računa o tehničko-ekonomskom delu projektovanja.

Treba znati da su gravitacioni izvori podzemni izvori čiji je kapacitet promenljiv tokom cele godine i u većini slučajeva je minimalan kada je potrošnja vode najveća i obrnuto. Dakle, shodno tome se postavlja pitanje na koliko vode dimenzionisati gravitacione dovodne cevovode da bi količina vode koja bi se pumpala bila optimalna, odnosno da bi se dobila optimalna cena postojeće pumpe i novog gravitacionog sistema.

Optimalna cena je najniža cena među svim analiziranim alternativama. Zbog toga će se tokom postupka optimizacije koristiti matematički modeli (linearno i dinamičko programiranje), gde se do rešenja dolazi rešavanjem niza zadataka. Ovi modeli optimizacije su formulisani u dve faze i to: eksterna faza u kojoj se određuje protok i interna procedura za određivanje optimalnog prečnika dovodnih cevovoda potrebnog za obezbeđenje prethodno utvrđenih potreba [2].

Kao što je već pomenuto u ovom radu, analiziraće se kombinovani sistemi vodosnabdevanja [1], gde se snabdevanje vodom obezbeđuje na dva načina: 1) gravitacionim putem, zahvatanjem vode sa izvora koji su na većoj nadmorskoj visini od rezervoara i koji se ne susreću sa potrebe za vodom u pojedinim godišnjim dobima, mesecima ili danima u godini (ne poklapaju se hidrogram kapaciteta izvorišta i hidrogram potrošnje vode) i 2) crpne stanice koje će dopuniti nedostatak vode u vodovodu. Odnosno, gravitacioni dovodni cevovodi mogu biti dimenzionisani za različite količine vode u rasponu od minimalnog do maksimalnog kapaciteta izvora. Ako se gravitacioni dovodni cevovodi dimenzionišu za minimalni kapacitet izvora, prečnik dovodnih cevi će biti najmanji, pa će stoga troškovi izgradnje dovodnog cevovoda biti minimalni, ali istovremeno i količine vode koje će morati da se dodaju pumpanjem biće maksimalna, što znači da će njihovo trajanje biti najduže i samim tim

će investicioni troškovi pumpane vode biti najveći, a troškovi za rad celog sistema maksimalni. Uz sve navedeno, očigledno je da je količina vode koja se zahvata iz gravitacionih izvora negde između maksimalnog i minimalnog kapaciteta izvora.

2. Računarski program „WATER-OPTIMUM“

Jednostavno i brzo rešenje matematičkog modela je od velikog značaja za inženjere, pa će se matematički model rešavati korišćenjem računarskog programa „WATER-OPTIMUM“, koji će na jednostavan i brz način odrediti količinu vode koja se koristi iz izvora gravitacije. „WATER-OPTIMUM“ je kompjuterski program koji je prvobitno kreiran za analizu postojećeg vodovodnog sistema u Makedoniji – ohridskog vodovoda sa osnovnom svrhom da se odredi optimalna količina gravitacione vode koja bi se koristila u budućnosti. u cilju smanjenja trenutnih troškova električne energije za crpljenje vode iz Ohridskog jezera. Štaviše, program je nadograđen tako da može da se koristi za projektovanje novih ili proširenje postojećih sistema, a takođe može pomoći u analizi nekoliko gravitacionih izvora vode svaki na različitim lokacijama i svaki na različitoj udaljenosti od naselja, kako bi se proveriti njihovu ekonomsku opravdanost za potrebe vodosnabdevanja naselja.

Slika 1. „WATER-OPTIMUM“ interfejs
Figure 1. „WATER-OPTIMUM“ interface

Rad sa „WATER-OPTIMUM“ moguć je samo u Windows operativnom sistemu, a njegov interfejs prikazan na slici 1 obuhvata polja za unos koja su bele boje i kontroliše ih korisnik programa, izlazna polja plave boje gde se nalaze rezultati analize i tri dugmeta. pod nazivom „Izračunaj“ (izračunaj) se prikazuju, gde se rezultati izlaza mogu pretraživati samo jednim klikom.

3. Matematički model

Softver „WATER-OPTIMUM“ koristi matematičke relacije za izradu analize COST – BENEFIT kombinovanih sistema vodosnabdevanja [1]. S obzirom na to da softver može analizirati više tipova kombinovanih sistema vodosnabdevanja, ovaj rad će dati kompletan opis matematičkog modela pri analizi postojećeg potpuno pumpnog vodovoda, za koji je potrebno odrediti optimalnu količinu buduće gravitacione vode, kako bi se optimizovali troškove električne energije u postojećoj crpnoj stanici. Prvobitno, pre početka korišćenja modela, potrebno je analizirati podatke o: potrošnji vode po mesecima, kapacitetu izvora po mesecima, količini ispumpane vode po mesecima, kao i skup podataka o geometrijskim karakteristikama postojeće pumpe i budući gravitacioni cevovod. Sledeći odnosi će uvek važiti za količinu pumpane vode:

$$QPU(I,J)=QP(I)-QG(J) \text{ za } QP(I)-QG(J) \geq 0 \quad (1)$$

$$QPU(I,J)=0 \text{ za } QP(I)-QG(J)<0 \quad (2)$$

gde: QPU(I, J) – količina pumpane vode,

QP(I) – potrošnja vode u vodovodnom sistemu i

QG(J) – kapacitet izvora gravitacione vode.

Zatim se radi ekonomska analiza iz koje se utvrđuju investicioni i eksploatacioni troškovi pumpnog i gravitacionog dela vodovoda.

3.1. Investicije i operativni troškovi pumpnog snabdevanja

S obzirom na to da se u ovom radu analizira sistem sa već postojećim potisnim cevovodom koji pumpom snabdeva vodu, za njega se neće utvrđivati investicioni troškovi, već će se analizirati samo troškovi eksploatacije, koji su u funkciji procenjene trenutne investicione vrednosti postrojenja, potisnog cevovoda i pumpne stanice. Dakle, ukupni operativni troškovi postojećeg pumpnog sistema se određuju prema sledećoj jednačini [2]:

$$\begin{aligned} Cp.dgod = & (C_{Ip.s} + C_{Ip.c} + C_{Io.p.c}) + \\ & + (C_{Ap.s} + C_{Ap.c} + C_{Ao.p.c}) + \\ & + (C_{Op.s} + C_{Op.c} + C_{Oo.p.c}) + C_e \end{aligned} \quad (3)$$

gde: ($C_{Ip.s} + C_{Ip.c} + C_{Io.p.c}$) – troškovi investicionog održavanja crpne stanice, cevovoda i cevovodne opreme.

($C_{Ap.s} + C_{Ap.c} + C_{Ao.p.c}$) – troškovi za amortizaciju pumpne stanice, cevovoda i opreme cevovoda.

($C_{Op.s} + C_{Op.c} + C_{Oo.p.c}$) – troškovi održavanja pumpne stanice, cevovoda i opreme cevovoda.

C_e – troškovi električne energije

Analizom eksploatacionih troškova dobija se cena m³ vode, pri čemu treba poštovati sledeća ograničenja:

Prvo: Ako $QP(I) > QZ(I)$ i $QG(J) \geq QZ(I)$ onda $QPU(I) = QP(I) - QZ(I)$

Drugo: Ako $QP(I) > QG(I)$, $QZ(I) \geq QG(J)$ i $QP(I) > QZ(I)$ onda $QPU(I) = QP(I) - QG(I)$

Treće: Ako $QG(J) > QP(I)$ i $QZ(J) \geq QP(I)$ onda $QPU(I) = 0$

Prema prethodnom, zapremina pumpane vode je:

$$\Sigma WPU(I) = \Sigma QPU(I) \times T(I) \quad (4)$$

gde: $QG(J)$ – kapacitet izvora gravitacije

$QZ(I)$ – količina zahvaćene gravitacione vode

$QP(I)$ – potrošnja vode u vodovodnom sistemu

$QPU(I)$ – količina pumpane vode

$T(I)$ – trajanje pumpanja

Cena m³ pumpane vode je:

$$CPU(I) = Cp.dgod / \Sigma WPU(I) \quad (5)$$

3.2. Investicioni i operativni troškovi gravitacionog dovoda

U ovom analiziranom slučaju, dovodni cevovod je potpuno novi cevovod za koji su investicioni troškovi određeni sledećom jednačinom [2]:

$$CIg = CIc + CIo.g.c \quad (6)$$

$$CIc = LG.C \times CD \quad (7)$$

$$CD = a + b \times D + c \times D^2 \quad (8)$$

gde: CIg – ukupna investiciona vrednost gravitacionog dovoda

CIc – vrednost investicije za izgradnju gravitacionog cevovoda

$L_{G.C}$ – dužina cevovoda

C_D – cena m' cevovoda

D – prečnik cevi

a, b и c – parametara za određivanje C_D

$C_{Io.g.c}$ – troškovi za izgradnju sve potrebne opreme za gravitaciono dovoda

Operativni troškovi se određuju na identičan način kao i operativni troškovi za napajanje pumpe, prema sledećoj jednačini:

$$Cg.dgod = (CIg.c + CIo.g.c) + (CAg.c + CAo.g.c) + (COg.c + COo.g.c) \quad (9)$$

gde: $(CIg.c + CIo.g.c)$ – troškovi investicionog održavanja cevovoda

$(CAg.c + CAo.g.c)$ – troškovi za amortizaciju pumpne stanice, cevovoda

$(COg.c + COo.g.c)$ – troškovi održavanja cevovoda i opreme cevovoda

Količina gravitacione vode koja će tokom analizirane hidrološke godine biti dovedena gravitacionim dovodnim cevovodom, pored hidroloških karakteristika zavisice i od proticaja za koji je dovodni cevovod dimenzionisan, kao i od potreba za vodom vodotoka. naseljavanje. Ovde treba napomenuti da količina vode koju potrošači neće koristiti (voda koja bi se prelila na rezervoaru ili unosu) nije predmet analize matematičkim modelom.

Dakle, sledeća ograničenja su uključena u model:

Prvo: Ako $QG(J) \geq QZ(I)$ onda $QZ(I) = QZ(I) - QPR(I)$

Drugo: Ako $QZ(I) > QG(J)$ onda $QZ(I) = QG(J) - QPR(I)$

Treće: Ako $QZ(I) \geq QP(I)$ i $QG(J) \geq QP(I)$ onda $QZ(I) = QP(I) - QPR(I)$

Prelivna količina vode se određuje prema sledećoj jednačini:

$$QPR(I) = QZ(I) + QPU(I) - QP(I) \quad (10)$$

Prema prethodnom, zapremina gravitacione vode je:

$$\Sigma WG(I) = \Sigma QZ(I) \times T(I) \quad (11)$$

gde: $QZ(I)$ – količina zahvaćene gravitacione vode

$QPR(I)$ – količina prelivne vode

Cena m^3 gravitacione vode je:

$$CG(I) = Cg.dgod / \Sigma WG(I) \quad (12)$$

3.3. Izbor optimalne količine gravitacione vode

Izbor optimalne količine gravitacione vode koja se isporučuje, a samim tim i izbor optimalnog prečnika gravitacionog cevovoda, vrši se sabiranjem ukupnih godišnjih troškova gravitacionog i pumpnog snabdevanja i pripadajućeg profita, a zatim izborom količina gravitacione vode za koju su ovi ukupni troškovi minimalni

$$CVgod(I) = Cg.dgod(I) + Cg.dgod(I) + TC(I) \quad (13)$$

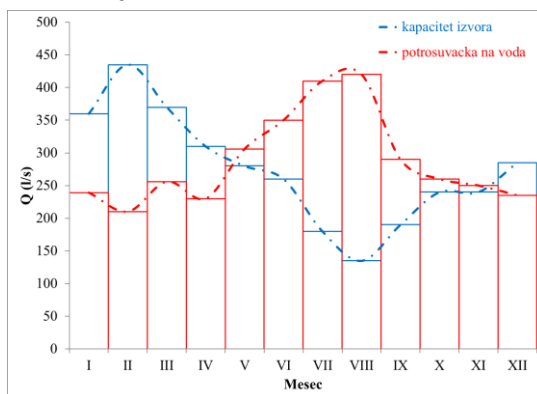
$$QZ = Qopt(Dopt) \text{ каде } Qopt(Dopt) \rightarrow CVgod = (CVgod)min$$

4. Primena matematičkog modela na realan vodovod

Kreirani matematički model je primenjen na realan vodovod – Studija slučaja Vodovod grada Ohrida. Trenutno je sistem za vodosnabdevanje Ohrida potpuno pumpan vodovod sa vodom koja se uzima iz Ohridskog jezera i pumpa do glavnog rezervoara.

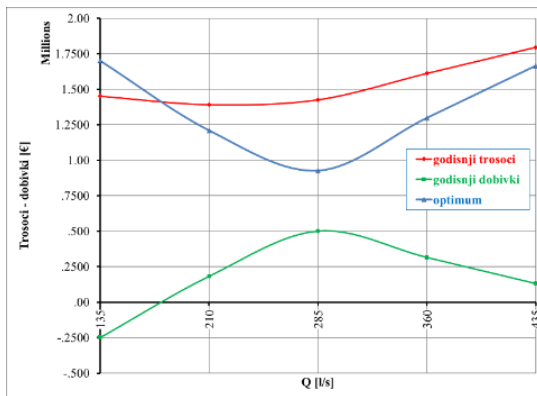
Za ovaj vodovod je karakteristično da postoje velike varijacije u potrebama za vodom tokom godine zbog činjenice da je Ohrid najveće turističko mesto u Makedoniji, pa u normalnim uslovima (bez turista) vodovod opslužuje 50.000 stanovnika, a u letnjem periodu ovaj broj naglo raste, a naglo poskupljenje struje dovelo je do situacije da se javno preduzeće suočava sa visokim troškovima ele-

ktrične energije. Zbog toga se pojavila potreba za dodatnom analizom, kako bi se utvrdile dodatne gravitacione količine vode, koje bi se apsorbirale iz najbližeg gravitacionog izvora koji se nalazi 20 km od Ohrida. Prema konceptu matematičkog modela, prvo su urađene analize za kapacitet izvorišta i potrošnju vode po mesecima, koje su prikazane na sledećoj slici.



Slika 2. Promena kapaciteta izvora i potrošnje vode po mesecima
Figure 2. Change in source capacity and water consumption by month

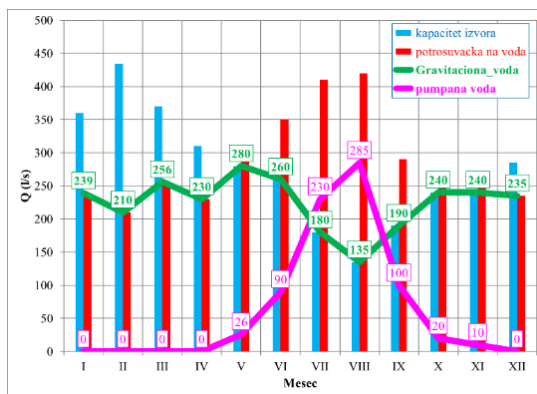
Iz urađenih analiza, koje su prikazane na slici 2, može se zaključiti da kapacitet gravitacionog izvora nije u mogućnosti da pokrije potrebe za vodom tokom svih meseci u godini, te će postojeće pumpno snabdevanje pokrивati razlike od zauzeta gravitacija voda i potrebe za vodom.



Slika 3. Rezultati za izbor optimalne količine gravitacione vode
Figure 3. Results for choosing the optimal amount of gravity water

Primenom softvera „WATER-OPTIMUM“ dobijeni su rezultati za izbor optimalne količine gravitacione vode od 285 l/s, izlazni rezultati matematičkog modela

su grafički prikazani na sledećoj slici. Dok je na slici 4 prikazana zauzeta količina gravitacione vode po mesecima u zavisnosti od kapaciteta izvorišta i potrošnje vode.



Slika 4. Količina gravitacione vode po mesecima

Figure 4. Amount of gravity water by month

5. Zaključak

U sistemima vodosnabdevanja gde su ulaganja i eksploatacioni troškovi visoki, a posebno današnje cene električne energije, neophodna je tehničko-ekonomska analiza za definisanje geometrijskih karakteristika cevovoda i objekata. Zbog toga je kreiran program „WATER-OPTIMUM“ kojim se na veoma brz i jednostavan način može tačno odrediti optimalna količina gravitacione vode, čime se u fazi izrade projekta lako rešavaju sve dileme koje bi projektant imao u vezi sa dimenzionisanje gravitacionog snabdevanja sa svim potrebnim objektima na njemu. Program takođe može analizirati postojeće sisteme i uticaj cene električne energije na njihovo optimalno upravljanje.

6. Literatura

- [1] Sharma A. K. and Swamee, P. K, *Cost considerations and general principles in the optimal design of water distribution systems*, 2006.
- [2] Donald G. Newnan, Ted G. Eschenbach and Jerome P. Lavelle, *Engineering Economic Analysis*. 2004.
- [3] Syed R. Qasim, Edward M. Motley & Guang Zhu, *Water Works Engineering (Planning, Design & Operation)*, 2000.
- [4] Lijie Cui, *Optimization of Urban Water Supply Headwork's*, 2003.