

PRIMERI PRIMENE GENETSKIH ALGORITAMA U PROJEKTOVANJU VODOVODNIH SISTEMA

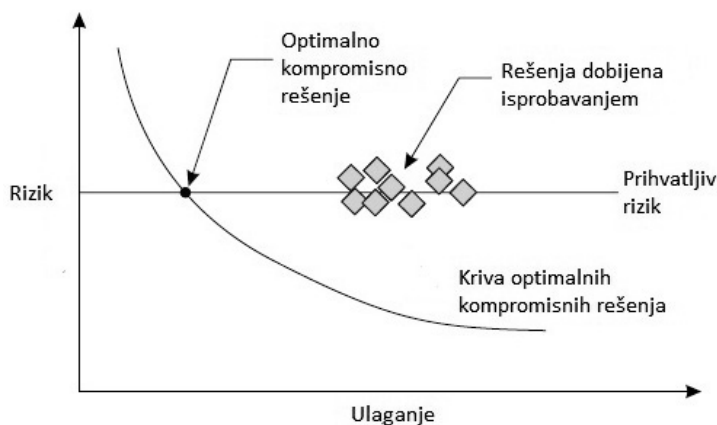
D. Ivetić¹, Ž. Vasilić¹, M. Stanić¹

ABSTRAKT: Optimizacijom vodovodnih sistema u postupku projektovanja može se ostvariti značajna ušteda u poređenju sa tradicionalnim pristupom *Trial and Error*. Najčešće se koriste genetski algoritmi kao optimizacioni metod. Razmatra se ekonomski aspekt kao kriterijum za izbor optimalnog rešenja, i primer kako pravilno formulisati kriterijumsku funkciju. Da bi bila ispunjena hidraulička ograničenja, npr u pogledu minimalnih i maksimalnih pritisaka, koristi se kaznena funkcija koja rešenja koja ne ispunjavaju ove uslove udaljava iz skupa povoljnih.

1. UVOD

Vodovodni sistemi i uopšte mreže i sistemi pod pritiskom često se sreću u hidrotehničkoj praksi. Budući da su to sistemi od vitalnog značaja za funkcionisanje i život bilo koje ljudske naseobine, velika pažnja se posvećuje projektovanju i održavanju. Svaki sistem za snabdevanje vodom mora da ispuni dva važna zahteva. Prvo, sistem mora da dostavi *dovoljnu* količinu vodu da podmiri zahteve potrošača, plus količinu vode neophodnu za snabdevanje protivpožarnih instalacija. Drugo, vodovodni sistem mora biti *pouzdan*, odnosno zahtevane količine vode moraju biti dostupne potrošačima 24 časa dnevno, 365 dana u godini. Na projektantu, odnosno na timu projektanata, je da uz ove zahteve ispoštuju još jedan, o kome se retko tako otvoreno govori ali koji je sve prisutan kao i ustalom i u svim sferama društva, a to je da njihovo rešenje bude najekonomičnije.

Zbog toga je neophodno pri projektovanju ovakvih sistema, pažljivo birati rešenja kako bi na kraju projektovani sistem ispunio i hidrauličko-socijalne zahteve kao i ove ekonomske. Napomenuće se odmah na početku da se ovaj rad ne bavi problemom pouzdanosti sistema budući da je integrisanje jednog modela za proračun pouzdanosti u algoritam dosta zahtevno, i u najmanju ruku zaslužuje posebnu priču za sebe. Da bi projektant dobio ekonomski najpovoljnije rešenje koje pritom ispunjava uslove za funkcionisanje vodovodnog sistema, neophodno je da optimizuje vodovodni sistem. Alternativa optimizaciji je tradicionalni postupak ručnog isprobavanja pri projektovanju, poznatiji kao *Trial and Error*. Može se uočiti na slici 1 razlika između ova dva postupka, gde se jasno vidi da bez optimizacionog modela teško može da se stigne do nekog optimalnog rešenja (Walski, Chase, Savic 2003).



Slika 1 Rešenja dobijena optimizacijom i isprobavanjem (Walski, Chase, Savic 2003)

¹⁾ Institut za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu
Korespondirajući autor: Damjan Ivetić, asistent doktorant, divetic@hikom.grf.bg.ac.rs

Sam zadatak optimizacije se može formulisati kao pronalaženje vrednosti promenljivih, pri kojima će ciljna odnosno kriterijumska funkcija imati ekstremnu (minimalnu ili maksimalnu vrednost), uz ograničenja koja definišu prostor mogućih rešenja (Stanić 1999). U ovom radu će biti prikazano na primerima primena genetskih algoritama (GA) kao optimizacione metode. Ideja je da se pokažu prednosti (mane) ove optimizacione metode, kao i način upotrebe.

Fokus je na optimizaciji vodovodne mreže kao dela vodovodnog sistema. Samim tim zgodno je odmah definisati promenljive koje će biti tu predmet optimizacije. Promenljive mogu biti različiti elementi sistema: prečnik cevi, tip pumpe, zapremina rezervoara, visinska kota rezervoara itd. Prve tri navedene su obrađene u ovom radu ali postoji prostor da se uvrste i ostale pa da se dobije još složeniji i verniji optimizacioni model.

U narednim poglavljima prvo će se proći kroz kratak opis načina formulisanja kriterijumske funkcije i samih genetskih algoritama koji se koriste u optimizacionom modelu, da bi se na kraju došlo do konkretne primene na dva primera.

2. OPTIMIZACIJA

Kod jedne standardne vodovodne mreže hidraulički zahtevi koji se nameću projektantu se uglavnom ogledaju kroz ispunjenje uslova minimalnih i maksimalnih pritisaka u mreži, minimalnih i maksimalnih brzina kao i zadovoljenje čvorne potrošnje. Pretpostavka je da je dispozicija sistema već poznata (u smislu oblika mreže i potrebnih elemenata mreže) pa njen izbor ne potpada pod optimizaciju. Kriterijum izbora optimalnog rešenja odnosno optimalne kombinacije prečnika cevi i drugih promenljivih, je ekonomski faktor (minimalna ulaganja ili minimalna ekonomska cena vode).

Najveći problem pri izboru optimalnih elemenata u mreži je ogroman broj mogućih rešenja. Broj mogućih rešenja eksponencijalno raste sa svakim dodatim elementom u mreži (npr mreža sa osam cevi i osam mogućih prečnika ima 8^8 odnosno 16777216 mogućih kombinacija, (Gessler 1985)). Poznavajući činjenicu da je za svako isprobano rešenje neophodno uraditi i hidraulički proračun mreže, jasno je da nije moguće u razumnom vremenskom periodu ispitati sva moguća rešenja. Zbog toga je zgodna primena genetskih algoritama i uopšte heuristika¹ jer oni mogu pronaći neko suboptimalno rešenje bez prolaska kroz sva moguća rešenja. Smanjenjem broja prolazaka može se optimizacioni algoritom učiniti znatno vremenski efikasnijim a da se pritom ne naruši kvalitet optimalnog rešenja.

2.1. Kriterijumska funkcija

Pri projektovanju vodovodnih sistema kao kriterijumi za vrednovanje alternativa uglavnom se sagledavaju dva aspekta: ekonomija i pouzdanost. Ekonomski kriterijum je korišćen u primerima koji su obrađeni u ovom radu budući da je za proračun pouzdanosti potrebna odvojena analiza. Kroz studije opravdanosti, vrednovanje projekta se ostvaruje preko nekoliko ekonomskih pokazatelja: IRR interna stopa rentabilnosti, PW neto sadašnja vrednost i B/C profitna stopa. Svaki od ovih pokazatelja se računa na osnovu prognoziranih novčanih tokova (*cash flow*) za neki unapred definisani vremenski period koji traje 20 do 30 godina. Za proračun ovih pokazatelja koristi se i postupak diskontovanja.

Ključni deo ekonomske analize je definisanje odnosno prognoziranje očekivanih prihoda i rashoda (*cash flow*). U okviru ekonomske analize opravdanosti, sa gledišta rashoda sistema, mogu se analizirati samo oni troškovi i rashodi koji su posledica aktuelnog projekta. Isto tako dobiti su samo prihodi koji nastaju izgradnjom odgovarajućeg sistema (npr u navodnjavanju višak prihoda koji se očekuje usled povećanja prinosa). Tako se opravdanost ulaganja u neki sistem dokazuje poređenjem sa alternativom *ne raditi ništa*. Čest je slučaj da se za vrednovanje alternativa koristi samo minimalizacija troškova, budući da su vodovodni sistemi od životnog

¹⁾ Heuristik DEFINICIJA (Weise 2009) – je deo optimizacionog algoritma koji koristi trenutno prikupljene informacije od strane algoritma kako bi pomogao pri izboru sledećeg potencijalnog rešenja koje će biti ispitano ili pri načinu na koji će sledeći kandidat da se konstruiše

značaja pa vrednovanje dobiti nije toliko jasno definisano. Problem je ekonomski vrednovati ovakvu investiciju budući da je ona preduslov za „normalan“ život. Bez vode za piće se ne može živeti i zbog toga se pitanje da li graditi ovakav sistem ili se odlučiti za opciju *ne raditi ništa*, najčešće i ne postavlja. Direktno dobiti u vodovodnim sistemima se jedino mogu ogleđati kroz količinu prodane vode. To je zapremina koja se isporučuje potrošačima u toku razmatranog perioda. Od jedinične cene vode će zavisiti visina dobiti. Za definisanje rashoda sistema potrebno je analizirati investicije u sistem i njegove godišnje troškove. Investicije u jedan sistem se dobijaju iz predmera i predračuna radova. S' obzirom da se ovde razmatra faza optimizacije, gde se bira jedno u nizu razmatranih rešenja, neophodno je uvesti određena pojednostavljena. Tako se investicije u vodovodnu sistem sastoje od investicije u distributivnu mrežu (I), investicije u pumpnu stanicu (I_{cs}) (građevinske i elektro-mašinske radove), investicije u rezervoare (I_{rez}) i tzv osnivačka ulaganja (I_{ou}) koje čine prethodni istražni radovi i troškovi projektovanja. Godišnji troškovi su najvećim delom energetski troškovi crpnih stanica (T_e), a takođe su uračunati i troškovi održavanja (T_{io}), amortizacije (T_a) i radne snage (T_{rs}).

Na kraju mogu se godišnji prihodi (B) i rashodi (C) sistema prikazati kao:

$$B = c_v * V_{pot} \quad (1.)$$

c_v – jedinična cena vode (NJ/m³)

V_{pot} – zapremina potrošene vode

$$C = I + I_{cs} + I_{rez} + I_{ou} + T_e + T_{io} + T_{rs} + T_a \quad (2.)$$

Kada su definisani prihodi (B) i rashodi (C) od sistema za razmatrani niz godina, mogu se sračunati gorespomenuti osnovni ekonomski pokazatelji opravdanosti ulaganja. Postoji različiti načini njihove implementacije u kriterijumsku funkciju. Na primer može se tražiti takvo rešenje koje daje maksimum po nekom od tri parametra: PW , IRR , B/C . Potrebno je napomenuti da na izbor optimalnog rešenja ne utiče to koji je parametar izabran, jer će najbolje rešenje svakako dati najbolje rezultate po svim parametrima.

2.1.1. Kaznene funkcije

Genetski algoritmi pri analiziranju varijantnih rešenja, svakoj ispitanoj varijanti nakon hidrauličkog proračuna unutar evaluacione funkcije, dodeljuju neku vrednost kriterijumske funkcije. Postavlja se pitanje šta se dešava u slučajevima kada neka od ispitanih varijanta ne zadovoljava neki od hidrauličkih uslova. Takvo rešenje nije prihvatljivo sa inženjerskog aspekta, pa ga je neophodno udaljiti iz skupa „dobrih rešenja“, kako se ne bi desilo da dobijemo ekonomski najisplativije rešenje koje ujedno nije ispunilo uslove projektovanja.

Zbog toga uvođenjem odgovarajuće kaznene funkcije, rešenja koja nisu ispunila neka ograničenja, se „kaznjavaju“ i samim tim se udaljavaju od skupa povoljnih rešenja. Vrednost kaznene funkcije se dodaje investicijama ili godišnjim troškovima i tako nepovoljna rešenja postaju znatno skuplja pa samim tim ne postoji opasnost da se jave kao optimalno rešenje.

Kaznena funkcija se računa koristeći C_p (specifičnu vrednost kaznene funkcije) koja množi vrednost prekoračenja nekog hidrauličkog ograničenja. Tako npr možemo definisati kaznenu funkciju za ispunjenje zahteva minimalne pijezometarske kote u čvoru j , kao:

$$I_p = \sum_j O(\max(0, (p_j^{\min} - p_j))) \cdot C_p \quad (3.)$$

Gde je O funkcija čija je vrednost veća od 0 kada zahtevi u pogledu minimalne pijezometarske kote u čvoru nisu ispunjeni, a p_j^{\min} i p_j minimalna i sračunata visina pritiska u čvoru j .

Vrednost člana C_p je specifična za svaki primer pa samim tim ne postoji neka teoretski preporučena vrednost za korišćenje. Ona se određuje probanjem za svaki pojedinačan slučaj. Jasno je da korišćenjem ovakvog tipa kaznene funkcije mogu da se kontrolišu uglavnom sva hidraulička ograničenja i uslovi pri ispitivanju varijantnih rešenja u optimizacionom procesu.

2.2. Korišćeni optimizacioni model

U radu su korišćeni genetski algoritmi (GA) kao optimizacioni metod koji se pokazao efikasnim kako u pogledu zahtevanog računarskog vremena tako i u pogledu pronalaska sub-optimalnih rešenja. Oni su korišćeni u okviru softverske aplikacije napisane u *MATLAB-u*, preko koje se može manipulirati sa distributivnim mrežama nanetim na digitalni model terena. Kako unutar optimizacionog procesa vodovodne mreže, broj poziva modela za hidraulički proračun može porasti do nekoliko stotina hiljada, čak i nekoliko miliona, jasno je da trajanje optimizacije najviše zavisi od efikasnosti algoritma za hidraulički proračun. Za hidraulički proračun koji se sprovodi u svakom prolasku odnosno pri ispitivanju svake varijante, korišćen je *EPANET* kao eksterni modul. *EPANET* u proračunu koristi metod čvorova odnosno njegovu π formulaciju. Kao alternativa korišćenju *EPANET-a* moguće je koristiti i druge module, kao i pravljenje sopstvenog hidrauličkog modela. Pokazano je (Stanić 2012) da se korišćenjem ΔQ metode u hidrauličkom modelu smanjuje potrebno računarsko vreme za nekoliko desetina puta! Kod velikih mreža ovakva ubrzanja igraju značajnu ulogu i omogućavaju znatno efikasniju analizu.

Da bi se pristupilo rešavanju optimizacionog zadatka, potrebno je definisati operatore GA (selekcija, ukrštanje i mutacija), odrediti odgovarajuće parametre za upotrebu operatora (verovatnoće), definisati način kodiranja rešenja (u ovim primerima korišćeno je kodiranje bitovima) i vrednost specifične kaznene funkcije C_p . Potrebno je ovde napomenuti da se primenom GA optimalno rešenje retko dobija iz prvog pokušaja već se variranjem parametara GA kroz nekoliko pokušaja dobija traženo rešenje. U ovom radu menjani su broj generacija odnosno broj iteracija proračuna kao i brojnost populacije tj. broj rešenja sa kojim GA operiše u jednoj iteraciji.

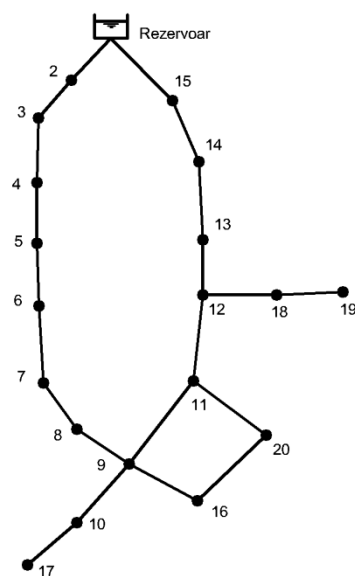
3. PRIMERI

Opisanim optimizacionim modelom za potrebe ovog rada ispitana su dva primera. Prvi primer je iz literature i često je korišćen za verifikaciju optimizacionih metoda. On se odnosi na rekonstrukciju distributivne vodovodne mreže grada Njujork (Newyork). Drugi primer je iz domaće prakse i vezan je za projekat rekonstrukcije magistralnog cevovoda Loznica – Gnla. Ovaj projekat je modifikovan tako da mogu da se ispitaju različite mogućnosti optimizacionog modela.

3.1. Rekonstrukcija distributivne mreže grada Njujork

Ovo je primer gravitacionog vodovodnog sistema koji se može reći dosta uprošćen, i dosta se razlikuje od realne i složene mreže u Njujorku. Mreža je definisana sa dvadeset čvorova, od kojih je jedan izvorni odnosno rezervoar, a ostalih devetnaest su potrošački čvorovi. Potrošački čvorovi se snabdevaju kroz mrežu tunela kojih ima dvadeset i jedan (slika 2.)

Uslovom zadatka su dati postojeći prečnici tunela, odgovarajući koeficijenti hrapavosti (tabela 1), potrošnje u potrošačkim čvorovima i katalog mogućih prečnika. Minimalni dozvoljeni pritisci su takođe definisani zadatkom i iznose 20 m vodenog stuba u svakom potrošačkom čvoru. Zadatak je naći optimalne prečnike tunela mreža u kojima će biti zadovoljeni uslovi minimalnih pritisaka koji trenutnom dispozicijom nisu ispunjeni. Na raspolaganju su dve opcije za svaki provodnik: 1.) duplirati postojeći tunel sa nekim od mogućih prečnika iz kata-



Slika 2 Shema distributivne mreže grada Njujork

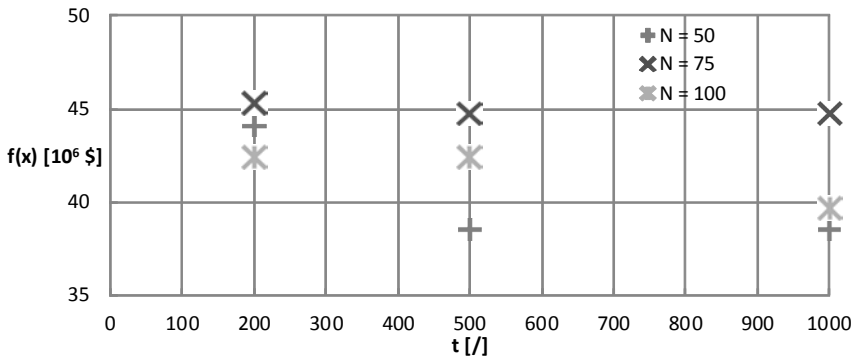
loga i 2.) ne raditi ništa. Zbog potrebe da postojeći tuneli funkcionišu neprekidno nije moguće intervenisati u njima i proširivati ih.

Da bi definisana ograničenja bila uvedena u GA, uvodi se kaznena funkcija (poglavlje 2.1.1.). Sada je kriterijumska funkcija f sačinjena od dve dela, investicije u distributivne mrežu I i kazne I_p koja se plaća ukoliko nisu ispunjeni uslovi minimalnih pritisaka u čvorovima.

$$\min_{(D_k)} f = I + I_p; \quad I = \sum_k C_k (D_k) L_k; \quad I_p = \sum_j O(\max(0, (p_j^{\min} - p_j)) \cdot C_p;$$

gde su C_k , D_k i L_k respektivno jednična cena tunela nekog prečnika po metru dužnom, prečnik tunela i dužina tunela u metrima. Vrednosti pritisaka u čvorovima se dobijaju hidrauličkim proračunom unutar evaluacione funkcije. Isprobavanjem različitih vrednosti za ovaj primer je određena konačna vrednost C_p od 15 000 000 \$.

Kao što je ranije spomenuto neki od parametara su varirani kako bi se pronašao globalni optimum. Menjani su broj generacija (200, 500, 1000) i brojnost populacije (50, 75, 100). Globalni optimum je poznat od ranije iz literature i iznosi 38.6 miliona \$. Rezultati primene GA i dobijene vrednosti kriterijumske funkcije su prikazani na dijagramu 1, a dobijeno optimalno rešenje na slici 3.

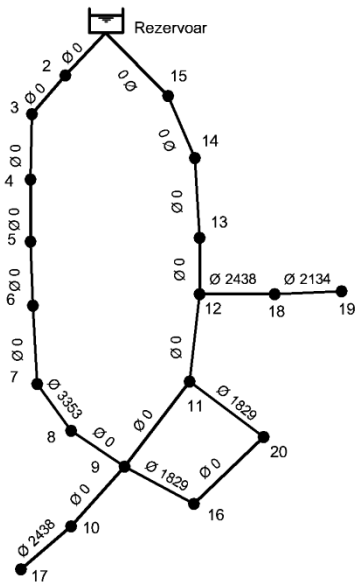


Dijagram 1 Rešenja dobijena primenom GA za različite brojnosti populacije

Primećuje se da je globalni optimum postignut za samo dve varijante izbora parametara i to sa najmanjom korišćenom brojnošću populacije. Teorijski ne postoji objašnjenje zašto je korišćenje manje populacije dalo bolje rešenje ali se može zaključiti da ovaj parametar svakako treba varirati pri korišćenju GA.

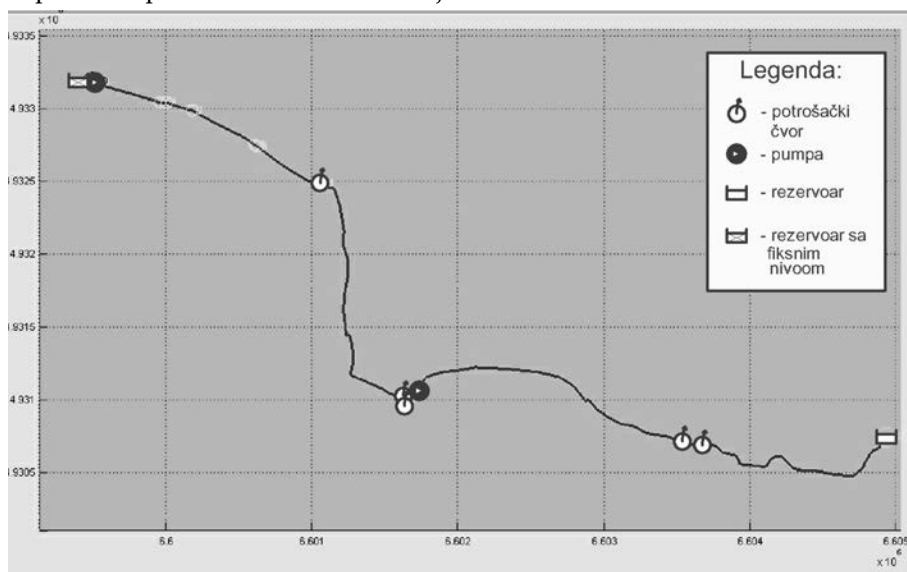
3.2. Magistralni cevovod Loznica – Gnila

Projekat ovog cevovoda je nastao kao proizvod potrebe da se obezbedi voda za piće jugoistočnom delu opštine Loznica. Planirana je rekonstrukcija magistralnog cevovoda na deonici dužine oko 7500 m. Pod rekonstrukcijom se podrazumeva zamena postojećih cevi prečnika 200 mm i postojeće crpne stanice koja se nalazi na početku cevovoda (slika 4), novim cevima odgovarajućih prečnika i novim pumpama koje će ispuniti potrebe za vodom. Autor je uzeo slobodu da postojeći primer prilagodi potrebama ovog rada kako bi mogla da se prikaže univerzalnost korišćenja ovog optimizacionog modela. Pod



Slika 3 Optimalno rešenje rekonstrukcije

univerzalnošću se podrazumeva da se uvrste kao predmet optimizacije, pored prečnika cevi i tip pumpi kao i zapremina rezervoara na kraju cevovoda.



Slika 4 Modifikovana postavka deonice magistralnog cevovoda Loznica - Gnila

Modifikacije koje su napravljene na projektu, omogućile su da imamo klasičnu crpnu stanicu kao predmet optimizacije, da imamo različitost u optimalnim prečnicima cevi jer je uvedena dnevna potrošnja u nasumično izabranim čvorovima koja pritom nije ravnomerna tokom dana. Na kraju dodat je i rezervoar na kraju cevovoda koji služi da snabdeva vodom čvorove u periodu povećane potrošnje i čija zapremina je takođe predmet optimizacije. Budući da postoje promene potrošnje u toku dana u hirauličkom proračunu je rađena 24 – časovna simulacija koja zahteva znatno više računarskog vremena za obavljanje.

Kriterijumska funkcija u ovom primeru koristi opisanu prognozu novčanih tokova (poglavlje 2.1). Svi opisani članovi investicija i godišnjih troškova su uračunati na osnovu podataka iz kataloga, i preporuka iz literature (j-na 2.). Investicije u rezervoar su određene paušalno, dok naravno kada bi se radila temeljnija analiza preporuka je da se sračuna na osnovu procene inženjera projektanta. Na osnovu ekonomske analize prihoda i rashoda, definiše se vrednost *ekonomske cene vode* koja je ujedno i vrednost kriterijumske funkcije:

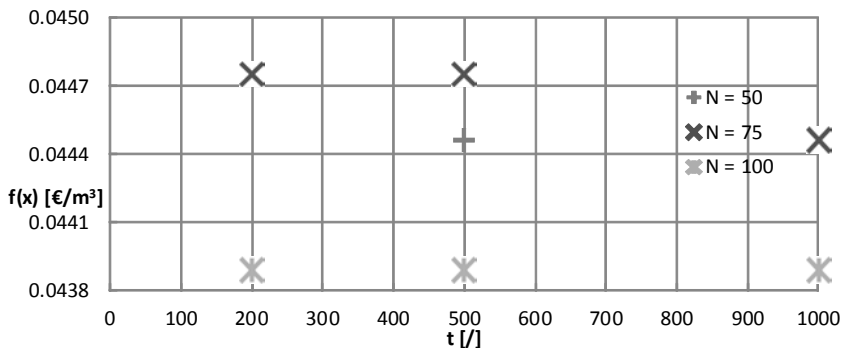
$$f = c_w = \frac{\sum_{t=0}^{n-1} C_t \cdot d(r,t)}{\sum_{t=0}^{n-1} V_{pot}} \quad (4.)$$

gde je $d(r,t)$ diskontni faktor za interesnu stopu r u vremenskom preseku t . Ekonomska cena vode predstavlja jediničnu cenu vode za koju će prihodi i rashodi u periodu od 30 godina, biti jednaki. Rešenje koje daju najnižu ekonomsku cenu vode će ujedno biti najpovoljnije.

Još je potrebno pojasniti upotrebu kaznene funkcije u ovom primeru. Kao i u prethodnom koristi se kaznena funkcija koja kažnjava sva prekoračenja pritiska u čvorovima ($C_p\text{-}pr = 100\ 000$ €). Za razliku od prethodnog slučaja pored uslova o minimalnom pritisku u čvoru (20 mvs), uvedeno je i ograničenje o maksimalnom pritisku (120 mvs) koje definiše tip cevi koji se koristi. Takođe uvedena je i blaža kaznena funkcija koja sputava ona rešenja u kojima će se javiti deficit u rezervoaru na kraju 24 – časovne simulacije ($C_p\text{-}rez = 10\ 000$ €). Ona je blaža iz

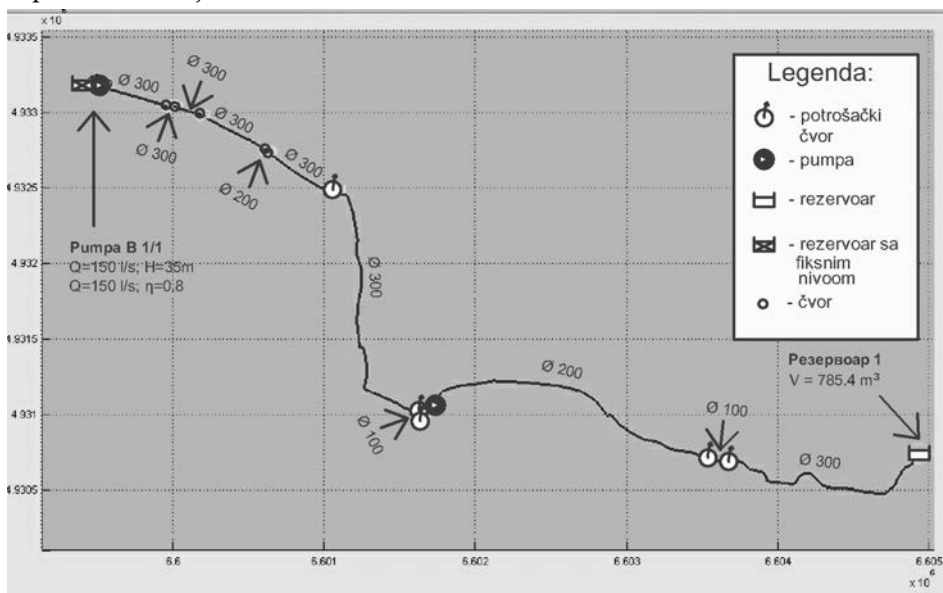
razloga što javljanje deficita u rezervoaru ne mora da znači da rešenje nije inženjerski prihvatljivo, već samo da ima manu koja se može nadomestiti u nekom slučaju.

Slično sa prethodnim primerom varirani su parametri GA: generacije (200, 500, 1000) i populacija (50, 75, 100). Globalni optimum za ovaj primer je već određen primenom postupka *enumeracije* (Ivetic 2012), koji iznosi $c_w = 0.0439 \text{ €/m}^3$. Prikaz najboljih rešenja za različite parametre dobijenih korišćenjem GA su prikazani na dijagramu 2, dok je samo optimalno rešenje prikazano na slici 5.



Dijagram 2 Rešenja dobijena primenom GA za različite vrednosti kriterijumske funkcije

Dobijeni rezultati odgovaraju globalnom optimumu za slučaj korišćenja populacije od 100 jedinki, što je i očekivano budući da se sa povećanjem brojnosti povećava prostor nad kojim se traži optimalno rešenje.



Slika 5 Optimalno rešenje izbora prečnika cevi, tipa pumpe i zapremine rezervoara

4. ZAKLJUČAK

Faza optimizacije vodovodnih sistema je nezaobilazna karika u projektovanju efikasnih vodovodnih sistema. Korišćenjem optimizacionih algoritama moguće je naći ekonomski najisplativije rešenje za date uslove u svakom pojedinačnom primeru. Genetski algoritmi su samo jedna od postojećih optimizacionih metoda koji su kao što se pokazalo u mnogobrojnim publikacijama, jedni od najčešće korišćenih. Karakteriše ih relativno kratko vreme za izvršenje

algoritma (za primer 2 u proseku 60 min po jednom prolasku kroz algoritam), kao i mogućnost pronalaska globalnog optimalnog rešenja bez prolaska kroz sve varijante.

Ključni aspekt primene optimizacionih algoritama je definisanje kriterijumske funkcije, kao i pravilna ekonomska analiza. Prikazana ekonomska analiza je i dalje dosta pojednostavljena, ali za potrebe prakse ona se može pretvoriti u složenu analizu koja obuhvata sve aspekte jednog projekta vodovodnog sistema. Prognoza novčanih tokova bi i u složenijoj strukturi bila model za analizu prihoda i rashoda samo bi se komponente ta dva parametra realnije modelirali. Postoji puno mogućnosti za poboljšanje prikazanog optimizacionog modela, koje ne zahtevaju veliki napor, što daje GA prednost u odnosu na neke druge metode.

Na prikazanim primerima pojašnjena je primena GA u optimizaciji vodovodnih sistema. U oba slučaju dobijeni su globalni optimumi odnosno ekonomski najpovoljnija rešenja uz ispunjavanje hidrauličkih ograničenja. Upotrebene su kaznene funkcije kako bi suboptimalna rešenja ispunila ograničenja koja nameće zadatak. Jasno je iz primera da se kaznene funkcije mogu koristiti za sve tipove hidrauličkih uslova za koje postoji opasnost da ne budu ispunjeni. Na projektantu odnosno na korisniku optimizacionih algoritama je da odredi specifične vrednosti kaznenih funkcija. Mišljenje autora je da je neophadan izvestan broj probnih prolazaka kroz algoritam sa različitim vrednostima C_p kako bi se ustanovila vrednost za koju se GA u konkretnom primeru najbolje ponaša. Pokazana je fleksibilnost GA u optimizovanju različitih tipova promenljivih (prečnik cevi, tip pumpe i zapremina rezervoara). Ovdje takođe postoji veliki prostor za napredak i uvrštavanje ostalih bitnih parametara koji opisuju jedan vodovodni sistem. Ograničenje korišćenog modela je samo u EPANET-u, odnosno ograničen je na samo one promenljive koje se mogu menjati i u samom programu EPANET. Da bi se to prevazišlo potrebno je koristiti ili neki drugi eksterni modul ili napraviti interni hidraulički model pomoću kojeg će moći da se obrade promenljive od interesa. To može biti pravac za neka buduća istraživanja jer može biti višestruke koristi od razvijanja algoritma za hidraulički proračun mreža pod pritiskom.

LITERATURA

1. Gessler J. (1985), *Pipe network optimisation by enumeration*, Computer applications for water resources., ASCE, Buffalo, N.Y., 572-581
2. Ivetić D. (2012), *Optimizacija mreža pod pritiskom*, Građevinski Fakultet.
3. Michalewicz Z. (1996), *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag Berlin.
4. Sharma N. (2012), *Stochastic techniques used for optimization in solar systems*, Elsevier, Haamirpur.
5. Stanić M. (1999), *Optimizacija mreža pod pritiskom u sistemima za navodnjavanje*, Građevinski fakultet, Beograd 1999.
6. Stanić M., Vasilčić Ž., Prodanović D., Branislavljević N., (2010), *Algoritmi za dekompoziciju, agregaciju i hidraulički proračun mreža pod pritiskom*, Zbornik radova sa 10. međunarodne konferencije "Vodovodni i kanalizacioni sistemi" Jahorina.
7. Stanić M., Ivetić D., Prodanović D., Vasilčić Ž., (2012) *Unapređenje primene genetskih algoritama u optimizaciji mreža pod pritiskom*, Zbornik radova sa 16. naučnog savetovanja SDHI i SDH, Gornji Milanovac
8. Walski T., Chase D., Savic D., Grayman W., Beckwith S., Koelle E. (2003), *ADVANCED WATER DISTRIBUTION MODELING AND MANAGEMENT*, Bentley Institute Press, 2003.