Unapređenje primene genetskih algoritama u optimizaciji mreža pod pritiskom

Miloš Stanić[1]
Damjan Ivetić[2]
Dušan Prodanović[3]
Željko Vasilić[4]

APSTRAKT: Efikasnost optimizacije vodovodnih mreža u pogledu utroška računarskog vremena zavisi od brzine hidrauličkog proračuna. U ovom radu je ispitana mogućnost korišćenja ΔQ metode za proračun mreža na primeru rekonstrukcije distributivne mreže grada Njujork. Ova metoda je korišćena u standardnom obliku, kao i u dve modifikovane varijante. Prva modifikacija se odnosi na korišćenje sračunatih korekcija ΔQ za postojeće stanje, pri hidrauličkom proračunu alternativnih rešenja u evaluacionoj funkciji. Druga modifikacija podrazumeva uvođenje korekcije protoka ΔQ kao dodatne promenljive, odnosno kao veličine koja se optimizuje. U radu su kao optimizacioni metod korišćeni genetski algoritmi (GA) koji su efikasni u pogledu računarskog vremena i u pronalasku suboptimalnih rešenja.
Ključne reči: Genetski algoritmi, ΔQ metod, Efikasnost, Prstenaste mreže

Improvement of application of genetic algorithms in optimization of pressurized pipe networks

ABSTRACT: Efficiency of optimization of water networks in terms of expenditure of computer running time depends on the speed of the hydraulic calculations.In this paper use of the ΔQ method for network calculation, was tested on the example of reconstruction of distribution network in New York City. This method was used in a standard format, as well as in two modified versions. The first modification relates to the use of computed corrections ΔQ for the current situation, in the hydraulic calculation of alternative solutions within the evaluation function. The second modification involves introducing flow corrections ΔQ as additional variables, to be also a subject of optimization. In this paper genetic algorithms (GA) were used as the optimization method, which are efficient in terms of running time and finding suboptimal solutions.
Key words: Genetic Algorithms, ΔQ method, Efficiency, Looped networks

[1] dr, Miloš Stanić, docent, Građevinski fakultet, mstanic@grf.bg.ac.rs
[2] Damjan Ivetić, student doktorant, Građevinski fakultet,divetic@hikom.grf.bg.ac.rs
[3] dr, Dušan Prodanović, vanredni profesor, Građevinski fakultet, eprodano@hikom.grf.bg.ac.rs
[4] Željko Vasilić, asistent, Građevinski fakultet, zeljkovasilic@hikom.grf.bg.ac.rs

1 Uvod

Efikasnost optimizacije vodovodnih mreža, pogotovo prstenastog tipa, u pogledu utroška računarskog vremena najviše zavisi od brzine hidrauličkog proračuna. Proračun prstenastih mreža znatno duže traje od proračuna granatih mreža zbog potrebe za iterativnim procesom rešavanja sistema nelinearnih jednačina. Takođe postoje razlike u pogledu korišćene metode proračuna prstenastih mreža. Metod čvorova (Π metod) zahteva rešavanje sistema nelinearnih jednačina, čiji broj odgovara broju čvorova u mreži. Dosta manji broj nepoznatih i samim tim brže rešavanje se javlja pri korišćenju ΔQ metode, gde su nepoznate korekcije protoka čija brojnost odgovara broju prstenova u mreži (P). Specijalan slučaj primene ΔQ metode, je proračun granatih mreža, koji se kod mreža pod pritiskom može obaviti bez iteracija u samo dva prolaza kroz mrežu, koja je prethodno topološki sortirana.

Kako unutar optimizacionog procesa mreže pod pritiskom, 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. 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 suboptimalnih rešenja. U okviru istraživanja koja su pratila pisanje ovog rada, učinjeno je nekoliko modifikacija standardnog pristupa u optimizaciji mreža pod pritiskom primenom GA, koje su imale za cilj povećanje efikasnosti optimizacionog algoritma.

Promena pristupa se odnosila na primenu ΔQ metode za proračun prstenastih mreža, koja ima manje nepoznatih u odnosu na metod čvorova, pa je samim tim i znatno efikasnija. Takođe prednost je što se u okviru predprocesiranja, primenjuju algoritmi iz teorije grafova, kojima se analizira topologija mreže. Analiza topologije mreže podrazumeva pre svega identifikaciju prostih prstenova u mreži, a time i definisanje osnovne granate mreže. Kako je za hidraulički proračun primenom ove metode potrebno odrediti početni raspored protoka, koji mora da zadovolji jednačine kontinuiteta u čvorovima mreže, za to je moguće iskoristiti rezultate algoritma za predprocesiranje i jednostavno sračunati protoke za osnovnu granatu mrežu i ove protoke usvojiti kao početne. Ovo je potrebno uraditi samo jednom i to u fazi predprocesiranja, a dalji pozivi evaluacione funkcije unutar koje se obavlja hidraulički proračun podrazumevaju samo iterativni proračun nepoznatih korekcija protoka u prstenovima. U primeru koji je prikazan u radu, primenom ΔQ metode, postupak optimizacije je ubrzan za red veličine.

Osim za hidraulički proračun, primena algoritama iz teorije grafova, omogućava i da se obavi agregacija složenih mreža, tako što bi se granati delovi i manji prstenovi u mreži mogli predstaviti kao čvorovi u agregiranoj mreži [5].

Kako se primena ΔQ metode, može razumeti i kao postupak "rasplitanja" prstenaste mreže na granatu, gde se na proizvoljnom preseku unutar prstena uvodi nepoznata korekcija protoka, to se u okviru istraživanja postavilo pitanje: da li je moguće optimizaciju sprovesti na fiktivnoj granatoj mreži koja je formirana iz prstenaste? Ova ideja je motivisana činjenicom da, osim što je za granate mreže hidraulički proračun sasvim jednostavan, iskustva u primeni GA za optimizaciju granatih mreža pokazuju da je konvergencija ka optimalnom rešenju veoma brza, čak i za nove mreže od nekoliko stotina cevi nepoznatog prečnika. Da bi se proverila ova mogućnost, urađene su dve varijante proračuna:

1. U prvoj varijanti su korekcije protoka preuzete iz hidrauličkog modela kojim se simulira postojeće stanje i nisu korigovane u toku optimizacije fiktivne granate mreže. Na ovaj način su dobijena rešenja koja su nešto lošija od rešenja koja su dobijena primenom ΔQ metode.
2. Kako se „intervencijama“ na mreži u toku optimizacije u suštini menjaju korekcije protoka, u drugoj varijanti je učinjen pokušaj da se u okviru optimizacije mreže primenom GA, korekcije protoka uvedu kao dodatne nepoznate, a da se hidraulički proračun i dalje sprovodi nad fiktivnom granatom mrežom. Ovaj pristup je takođe dao zanimljive rezultate, koji će biti prikazani u nastavku.

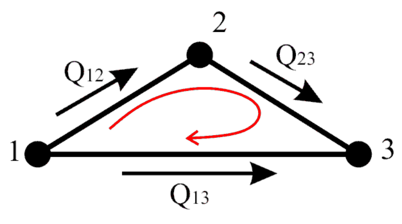
Cilj ovog rada je ubrzanje optimizacije mreža pod pritiskom primenom GA, pre svega ubrzavanjem evaluacione funkcije koja je integrisana u sam optimizacioni algoritam, ali i provera mogućnosti primene novog pristupa u optimizaciji mreža pod pritiskom. I pored toga što ovaj pristup podrazumeva uvođenje novih nepoznatih, u radu se pokazuje da rezultati opravdavaju dalja istraživanja u ovom pravcu. Rezultati optimizacije će biti prikazani, na poznatom primeru iz literature: rekonstrukcija distributivne mreže grada Njujorka.

2 ΔQ metoda

2.1 Osnova hidrauličkog proračuna

Rezultat hidrauličkog proračuna mreže su dve osnovne veličine: protoci u cevima (Q_{ij}) i pritisci u čvorovima izraženi preko pijezometarske kote (Π_i). Za rešavanje ovog problema koriste se energetska i jednačina kontinuiteta. Sistem ovih jednačina se rešava po izabranoj nepoznatoj veličini, najčešće protoku u cevima.

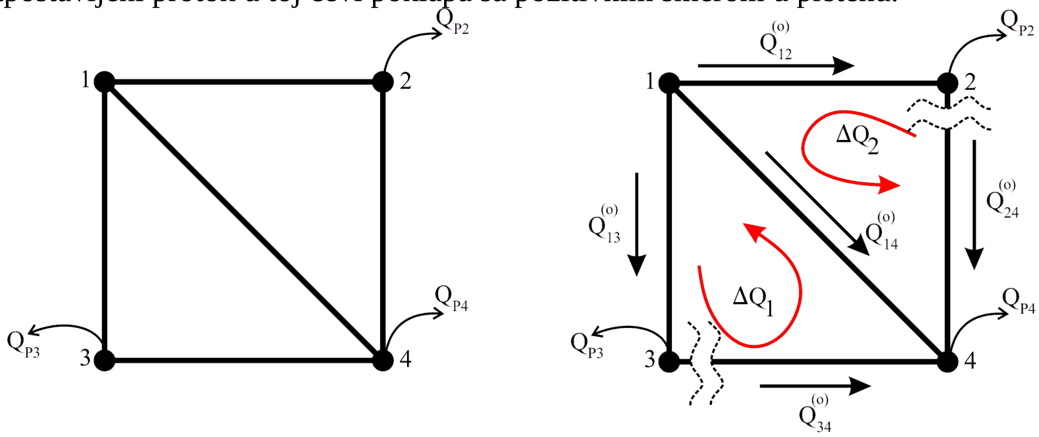
Za slučaj prstenastih mreža koje su od interesa za ovaj rad pored jednačina kontinuiteta, moraju se koristiti i energetske jednačine napisane za prstenove u mreži kako bi se formirao sistem jednačina koji će omogućiti rešavanje problema. U prstenu mora biti ispunjen uslov da je suma gubitaka jednaka nuli (1) jer prsten predstavlja zatvorenu putanju koja počinje i završava se u istoj tački koja mora imati istu π kotu. Brzinske visine i lokalni gubici u cevima se zanemaruju.



Slika 1 Energetska jednačina za prsten

$$\sum_{p} \Delta E_{ij} = 0 \qquad (1)$$

Neophodno je pri postavljanju energetske jednačine voditi računa o usvojenom pozitivnom smeru u prstenu (na slici označen crvenom strelicom), kako bi se gubitak za svaku cev označio sa znakom plus (+) ili minus (-) u zavisnosti od toga da li se pretpostavljeni protok u toj cevi poklapa sa pozitivnim smerom u prstenu.



Slika 2 Određivanje pretpostavljenih protoka

Početni korak proračuna je određivanje inicijalnih odnosno pretpostavljenih protoka u mreži ($Q_{ij}^{(o)}$) uz zadovoljenje jednačina kontinuiteta u svim potrošačkim čvorovima (slika 2).

Kako bi se odredili početni protoci, prstenovi se raskidaju u blizini čvorova i formiraju granatu mrežu u kojoj je sada raspored protoka određen jednoznačno. Prema prethodnoj slici ovi protoci su:

$$\begin{aligned} Q_{12}^{(o)} &= Q_{P2} \quad ; \quad Q_{13}^{(o)} = Q_{P3} \\ Q_{14}^{(o)} &= Q_{P4} \quad ; \quad Q_{34}^{(o)} = Q_{24}^{(o)} = 0 \end{aligned} \tag{2}$$

Upravo ovaj korak je interesantan za rad, jer formiranjem granate mreže dobijamo jednostavnu dispoziciju za koju je optimizacioni proces znatno brži nego u slučaju prstenaste mreže. Kasnije će se više pažnje posvetiti ovome. Kad bi se sa inicijalnim protocima napisala energetska jednačina za prsten, gubitak energije ne bi bio jednak nuli. Zbog toga se protoci koriguju za neku vrednost koja se označava sa ΔQ_P (p je redni broj prstena) koja je karakteristična za svaki prsten. Vrednost korekcije mora biti takva da zadovolji prethodno naveden uslov o guibtku energije u prstenu.

Određivanje vrednosti korekcije ΔQ_P se obavlja u iteracijama preko jednačine 3:

$$\Delta Q_1^{i+1} = \Delta Q_1^{i} - \frac{\sum\limits_{p} sign \cdot K_{ij} \left| Q_{ij}^{(0)} + \sum\limits_{cev} sign \cdot \Delta Q_p^{i} \right| \cdot \left(Q_{ij}^{(0)} + \sum\limits_{cev} sign \cdot \Delta Q_p^{i} \right)^{m-1}}{m \sum\limits_{p} K_{ij} \left| Q_{ij}^{(0)} + \sum\limits_{cev} sign \cdot \Delta Q_p^{i} \right|}$$

(3)

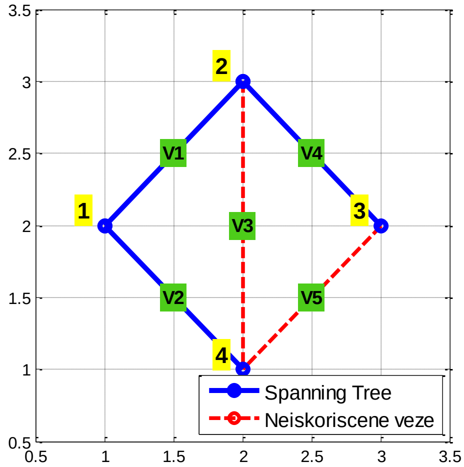
gde je *sign* jednak 1 ako se pretpostavljeni smer protoka u cevi poklapa sa usvojenim smerom korekcije protoka ΔQ_2. U suprotnom *sign* je jednak -1. Suma $\sum\limits_{p}$ označava sumu za sve cevi jednog prstena a suma $\sum_{cev} sign \cdot \Delta Q_p^i$ sumu svih korekcija koje prolaze kroz razmatranu cev *ij*. Vrednost ΔQ je definisana onda kada je suma gubitaka unutar prstena jednaka 0, odnosno kada je razlika ΔQ između dve uzastopne iteracije manja od definisane margine. Vrednost *m* je koeficijent koji zavisi od korišćene metode za proračun hidrauličkih gubitaka (*m* = 1.85 za *Hazen – Williams*). Karakteristika cevi *K* za ovaj primer definisana sa gubicima računatim preko formule *Hazen – Williams*:

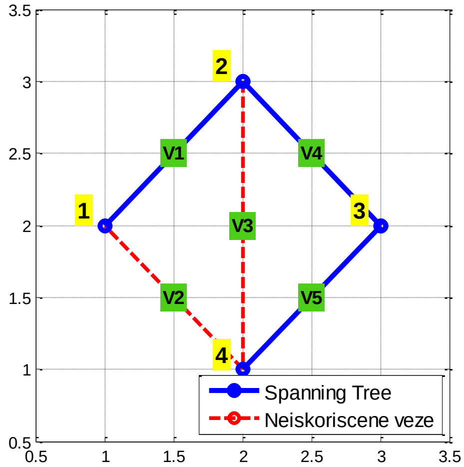
$$K_{ij} = \frac{10.67L}{C^{1.85}D^{4.87}}Q^{1.85} \tag{4}$$

C je konstanta hrapavosti za formulu *Hazen – Williams*, *D* je prečnik cevi dok je *Q* protok.

2.2 Detektovanje prostih prstenova u mreži

Neophodan korak u okviru svakog razvijenog algoritma za ΔQ metodu je detekcija „prostih“ prstenova u grafu (*eng.Minimal Basis Loops*). Ovaj problem spada u domen teorije grafova. Pod prostima prstenom se podrazumeva prsten, koji se ne može predstaviti kao unija drugih prstenova. Korak koji prethodi detekciji prostih prstenova, je detektovanje prstenova u grafu na osnovu rezultata primene nekog od algoritama za pretraživanje grafa (BFS ili DFS). Broj prstenova odgovara broju neiskorišćenih veza nakon pretrage grafa nekim od navedenih algoritama. Problem je što prstenovi koji formiraju te veze najčešće nisu prosti i jednoznačni odnosno menjaju se sa promenom tačke iz koje se kreće u pretragu. (slika 3).





Slika 3 Pretraga BFS algoritma od tačke 1 (levo) i tačke 3 (desno)

Dobijaju se prstenovi:

Početna tačka je čvor 1	Početna tačka je čvor 3
PRSTENOVI (veze) = 'prsten_1' '1 2 3'	PRSTENOVI (veze)= 'prsten_1' '4 5 3'

'prsten_2' '2 1 4 5'	'prsten_2' '1 4 5 2'

Primećuje se da u oba slučaja nisu dobijeni „prosti“ prstenovi. Prsten „prsten_2“ se dvaput dobija kao unija prstena ‘1 2 3’ i ‘4 5 3’.

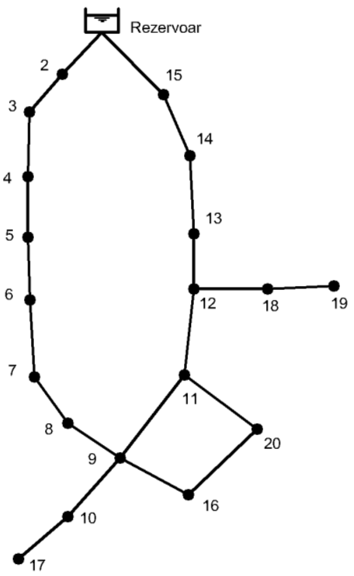
Algoritam koji se ovde koristi za detekciju „prostih“ prstenova predstaviti će se samo kroz korake:

1. Izvršiti pretragu grafa (npr.BFS algoritmom),
2. Izvršiti transformaciju razapinjućeg stabla (ST) dobijenog u prethodnom koraku u cilju dobijanja takve konfiguracije koja će dati prstenove što manje ukupne dužine (pod dužinom se podrazumeva broj veza) i
3. Uočiti prstenove koji se preklapaju i izvršiti dekompoziciju prstenova tamo gde je ona potrebna.

3 Integracija ΔQ metode u GA za optimizaciju mreža pod pritiskom primer Newyork

3.1 Standardna primena ΔQ metode

Već je spomenuto da su za optimizaciju na primeru Njujork korišćeni GA. Ideja je da se uporede rezultati dobijeni standardnom primenom GA koja podrazumeva upotrebu *EPANET*-a za hidraulički proračun i predloženom modifikacijom primene GA (misli se na sve tri varijante primene ΔQ metode). Genetski algoritmi umesto korišćenja stvarnih vrednosti iz vektora promenljivih, operišu sa kodiranim nizom bitova. U ovom primeru, i uopšte je uobičajeno kod vodovodnih mreža, kao promenljive se koriste prečnici cevi. Pored prečnika, promenljive mogu biti i rezervoari i tip pumpi [1]. Dalje se nad skupom kodiranih rešenja primenjuju operatori GA, selekcija, reprodukcija (ukrštanje), mutacija i nekad operator zamene (karakterističan za evolucione algoritme). Sledeći korak je proračun vrednosti kriterijumske funkcije na osnovu koje se ocenjuje pogodnost varijante. Skup rešenja u narednoj iteraciji se dobija na osnovu kontrolisane slučajnosti. Detaljno o primeni GA može se pročitati u literaturi [2].



Slika 4 Shema distributivne mreže grada Njujork

Mreža Njujork (slika 4) je primer gravitacionog vodovodnog sistema koji se često pojavljuje u literaturi. Ona je definisana sa dvadeset čvorova, od kojih je jedan izvorni odnosno rezervoar, a ostali potrošački. Čvorovi su povezani mrežom od dvadeset i jednog tunela.

Trenutnom dispozicijom sistema nisu zadovoljeni uslovi minimalnih pritisaka u čvorovima mreže (20 mvs). Nije moguće intervenisati na postojećim tunelima, odnosno proširivati ih, pa su na raspolaganju dve opcije za svaki provodnik: 1.) duplirati postojeći tunel sa nekim od mogućih prečnika (15 različitih), 2.) ne raditi ništa. Zadatak je naći optimalne prečnike novih tunela mreža sa kojima će biti zadovoljeni zadati uslovi minimalnog pritiska.

Hidraulički proračun u procesu optimizacije se obavlja korišćenjem ΔQ metode u uobičajenoj formi. Mreža Njujork sadrži dva prstena, za koje se uvode dve korekcije protoka ΔQ_1 i ΔQ_2. Prstenovi se prekidaju u blizini slučajno izabranih čvorova (u ovom slučaju čvorova 6 i 20). Na mestu preseka uvode se fiktivni čvorovi 6' i 20' u kojima se sad završavaju prekinute cevi. Korekcije protoka se u mrežu unose kao potrošnja za čvorove preseka (6 i 20), odnosno kao dotok za fiktivne čvorove (6' i 20'). Algoritam za primenu u optimizaciji se sastoji od dva koraka:

1. Predprocesiranje – ovaj korak prethodi pozivanju GA, i u okviru koga se obavi topološko sortiranje grafa, detekcija prostih prstenova i hidraulički proračun postojeće mreže, na osnovu kojeg se definišu početne vrednosti korekcija ΔQ. Pretpostavka je da se vrednosti ΔQ sračunate na ovaj način ne razlikuju puno od vrednosti korekcija za svako varijantno rešenje pa se radi ubrzavanja konvergencije mogu koristiti kao početne vrednosti kada se pređe u naredni korak,
2. Proračun u evaluacionoj funkciji – za nove prečnike dobijene u okviru bilo koje ispitane alternative, se računaju korekcije ΔQ iz predprocesiranja kroz iteracije, primenom jednačine (4). Sa novim korekcijama obavlja se samo proračun rasporeda pritisaka, što je moguće uraditi u jednom prolazu kroz osnovnu granatu mrežu, koja je definisana i topološki sortirana u predprocesiranju.

Kriterijumska funkcija f se za ovaj primer sastoji od dva dela, investicije u distributivnu mrežu I i kazne I_p koja se plaća ukoliko nisu ispunjeni uslovi minimalnih pritisaka u potrošačkim čvorovima (p^{min}).

$$\begin{aligned} &\min_{\{D_k\}} f = I + I_p \\ &I = \sum_k C_k(D_k)L_k \\ &I_p = \sum_j \max(0,(p_j^{\min} - p_j)) \cdot C_p \end{aligned} \tag{5}$$

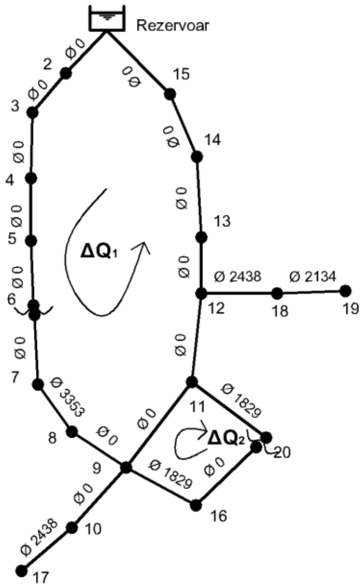
Član C_p je specifična vrednost kaznene funkcije (u ovom primeru iznosi 15 miliona \$/m), a j redni broj čvora u mreži. O je funkcija čija je vrednost veća od 0 kada zahtevi u pogledu minimalne pijezometarske kote u čvoru nisu ispunjeni, a p_j^{min} i p_j minimalna i sračunata visina pritiska u čvoru j.

Da bi se pristupilo proračunu korišćenjem GA potrebno je definisati sledeće opcije i operatore GA:

- Rešenje se kodira nizom bitova, što znači da svaki tunel (od 21) može uzeti neku od 16 varijanti (predstavlja se sa 4 bita), pa je jedno rešenje niz od 21 * 4 bita.
- Pogodnost rešenja (*F*) se računa direktno odnosno na osnovu vrednosti kriterijumske funkcije
- Selekcija je proporcionalna (tzv. rulet selekcija)
- Zamena rešenja se vrši na osnovu njihovog ranga
- Koristi se model ukrštanja u dve tačke (preporučeno i u literaturi)
- Koristi se reinicijalizacija za model mutacije gde se na slučajan način odredi vrednost promenlive koja se mutira

Vrednost globalnog optimuma kriterijumske funkcije f je poznata iz literature i iznosi 38.6 miliona \$. Globalni optimum je dobijen primenom ΔQ metode čime je proverena konvergencija GA. Kako bi dokazali ranije spomenutu tvrdnju da je ova metoda za hidraulički proračun dosta brza, upoređena se sa rezultatima dobijenim u radu [1] gde je za hidraulički proračun korišćen eksterni modul *EPANET*.

Razlika u korišćenju metode ΔQ i *EPANET*-a za hidraulički proračun je značajna u pogledu vremena potrebnog za optimizaciju. Mereno je potrebno vreme za primenu u oba slučaja sa gore navedenim podešavanjima operatora, dok je broj iteracija bio 500 a brojnost populacije iznosila 50. Optimizacija sa korišćenjem ΔQ metode je trajala svega 15 sekundi, dok je sa primenom *EPANET*-a ona bila znatno duža tj oko 6 minuta i 30 sekundi. Slikovito opisano u prvom slučaju optimizacioni proračun je 26 puta kraći. Jasno je da je ovo relativno prost primer pa su objektivno gledano, u oba slučaja trajanja prihvatljiva. U praksi se javljaju vodovodne mreže sa daleko većim brojem elemenata (cevi), za koje je hidraulički proračun zahtevniji, na kojima ova razlika još više dolazi do izražaja. Ovakav stepen ubrzanja optimizacionog algoritma je iznenađujući i za autore. Dodatna pogodnost je to što budući da je optimizacija toliko ubrzana, lako se mogu menjati i ispitivati operatori GA, što je uostalom i preporuka pri primeni GA, zato što za različite primere, različiti modeli operatora daju najbolje rezultate.



Slika 5 Optimalno rešenje rekonstrukcije distributivne mreže grada Njujork

Na slici 5 je prikazano rešenje za rekonstrukciju ove distributivne mreže, gde se primećuje da je potrebno intervenisati na samo 6 tunela.

3.2 Primena ΔQ metode sa fiksnim ΔQ_1 i ΔQ_2 usvojenim iz proračuna postojeće mreže

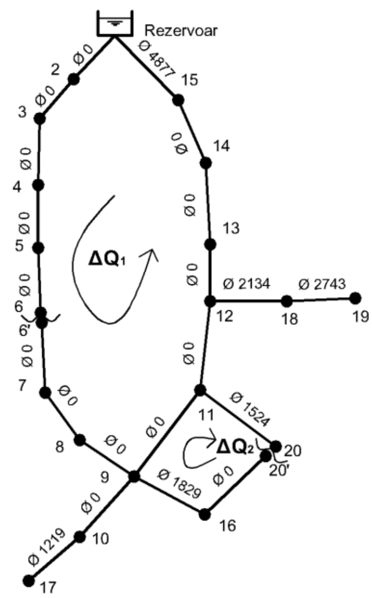
Ovaj pristup u primeni ΔQ metode predstavlja blagu modifikaciju njene standardne primene opisane u prethodnom poglavlju. Cilj je bio da se dodatno ubrza optimizacioni algoritam. Jasno je da, ako želimo da ubrzamo optimizacioni algoritam, najpovoljnije je intervenisati na evaluacionoj funkciji u okviru koje se sprovodi hidraulički proračun, jer se ona računa za svako ispitano rešenje koji kao što je spomenuto može biti puno. Forma modifikovanog algoritma je slična standardnoj pa se nalik njoj može predstaviti kroz dva koraka:

1. Predprocesiranje – korak koji prethodi GA, i u okviru koga se obavi topološko sortiranje grafa, detekcija prostih prstenova i hidraulički proračun postojeće mreže, na osnovu kojeg se definišu početne vrednosti korekcija ΔQ. Kroz standardnu primenu ΔQ metode u optimizacionom algoritmu je dokazana pretpostavka da se korekcije ΔQ_1 i ΔQ_2 izračunate za postojeće stanje ne razlikuju znatno od korekcija koji odgovaraju bilo kom varijantnom rešenju. Upravo ova činjenica je poslužila kao osnov za ovakav način primene ΔQ metode.
2. Proračun u evaluacionoj funkciji – za nove prečnike dobijene u okviru bilo koje ispitane alternative, se sada koriste korekcije ΔQ iz predprocesiranja. Sa takvim korekcijama obavlja se samo proračun pijezometarskih kota, budući da su protoci jednoznačno određeni u predprocesiranju, čime se proračun završava.

Ubrzanje algoritma se ostvaruje tako što se umesto što se za svaku vrednost kriterijumske funkciji kroz iteracije prepravljaju korekcije ΔQ_1 i ΔQ_2, koriste njihove vrednosti koje su prosleđene kriterijumskoj funkciji. Važno je napomenuti da ovakvim pristupom pijezometarske kote u čvoru na mestu preseka prstena i njemu susednog fiktivnog čvora, nisu jednake, odnosno uslov da je suma gubitaka u cevima koje čine prsten nije jednaka 0. Za našu analizu to ne predstavlja problem, već nam je od interesa da pritisci u svim čvorovima ispunjavaju uslove minimalnog pritiska propisane zadatkom.

Primenom na primer mreže grada Njujork, dobijene su nešto više vrednosti kriterijumske funkcije od one ranije dobijenog globalnog optimuma. Ispitivana su razna podešavanja operatora GA i dobijeno je najbolje rešenje za koje je vrednost kriterijumske funkcije iznosi 40.2 miliona $. Dobijeno rešenje je prikazano na slici 6. Iako nije globalni optimum može se smatrati da je rešenje relativno blisko njemu. Sa druge strane trajanje optimizacionog proračuna je dodatno skraćeno u odnosu standardnu primenu. Poređenja radi za podešavanja koja su spomenuta u prethodnoj glavi (500 iteracija i brojnost populacije od 50), standardna primena ΔQ je zahtevala 15 sekundi, dok ovde opisana modifikacija hidrauličkog proračuna zahteva svega 5 sekundi.

Jasno je da je dodatno skraćenje potrebnog vremena za izvršenje optimizacionog algoritma ostvareno, dok je narušena sposobnost konvergencije GA ka globalnom optimumu. Degradiranje konvergencije GA je verovatno prouzrokovano neispunjavanjem uslova da energetski gubici u cevima koje čine jedan prsten budu jednaki 0.



Slika 6 Rešenje dobijeno primenom modifikovanog algoritma sa fiksiranim ΔQ

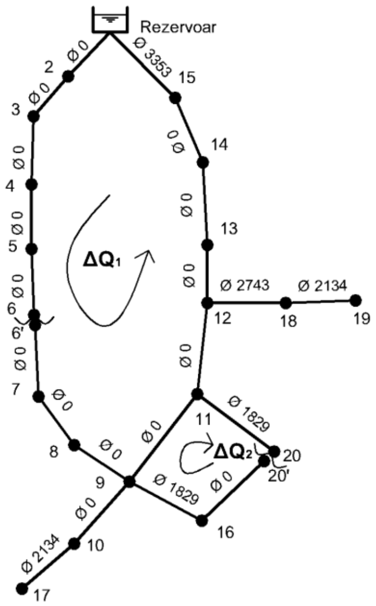
3.3 Primena ΔQ metode sa ΔQ_1 i ΔQ_2 kao dodatnim promenljivim

Poslednja ispitana varijanta primene ΔQ metode podrazumeva uvodjenje ΔQ_1 i ΔQ_2 kao dodatne promenljive u optimizacioni proračun. Želja je bila da se ispita mogućnost konvergencije GA ka globlnom optimumu, u varijanti gde je moguće menjati vrednosti korekcije kako bi se dobila što bolja rešenja. Kao i za prethodne varijante, algoritam će se predstaviti kroz korake:

1. Predprocesiranje – korak koji prethodi pozivanju GA, gde se obavlja topološko sortiranje grafa, detekcija prostih prstenova i hidraulički proračun postojeće mreže, na osnovu kojeg se definišu početne vrednosti korekcija ΔQ. Vrednosti korekcije se prenose u sledeći korak,
2. Proračun u evaluacionoj funkciji – kodirano rešenje sada pored informacije o prečnicima kojima se dupliraju postojeći tuneli, nosi i informaciju o multiplikativnom faktoru kojim se množe korekcije ΔQ iz prethodnog koraka. Korekcije protoka su sada izmenjene i kao takve se koriste za proračun pijezometarskih kota, čime se proračun završava.

Za svaku korekciju protoka ΔQ, koristi se poseban multiplikativni faktor. Vrednost ovog faktora je ograničena i nalazi se u granicama od 0.75 do 1.25. Na ovaj način je ograničena i vrednost korekcije ΔQ, kako GA ne bi zalutao u neka nerealna rešenja. Pojedinačan faktor se kodira sa 4 bita, što znači da sada svako kodirano rešenje ima 84 + 2*4 odnosno 92 bita.

Ovaj pristup je doveo do zadovoljavajućih rezultata. Na primeru Njujork algoritam je primenjen sa ranije spomenutim podešavanjima. Kao najbolje rešenje dobijena je vrednost kriterijumske 39.8 miliona $. Prikaz dobijenog rešenja može se videti na slici 7. U poređenju sa prethodnom varijantom može se konstatovati da je dobijeno nešto bolje rešenje. Vreme potrebno za izvršenje optimizacionog algoritma je neznatno sporije od varijante u kojoj se koriste korekcije protoka za postojeću mrežu. Uzimajući u obzir dobijene rezultate, ovaj pristup primeni optimizacionog algoritma treba dodatno ispitati u budućnosti. Potrebno je ispitati širok spektar parametara i modela operatora GA, kako bi se eventualno poboljšala konvergencija ka optimalnom rešenju. Pri projektovanju novih mreža upravo uvođenje korekcije ΔQ u kodirano rešenje je prihvatljivo, budući da tada ne postoji neko postojeće stanje na osnovu kojeg možemo da sračunamo početnu vrednost korekcija protoka koju bi koristili u evaluacionoj funkciji.



Slika 7 Rešenje dobijeno primenom modifikovanog algoritma sa promeljivim ΔQ

Potrebno je napomenuti da ni u ovom slučaju kao ni u prethodnom nije zadovoljen uslov korišćenja ΔQ metode, da gubici unutar jednog prstena budu jednaki nuli. Ponoviće se da ovaj uslov nije od suštinskog značaja dokle god su uslovi minimalnog pritiska u čvorovima zadovoljeni. Primena ove varijante proračuna evaluacione funkcije zahteva uvođenje još jedne kaznene funkcije u kriterijumsku funkciju. Budući da se korekcije protoka ΔQ menjaju, može se javiti jedna nerealna situacija. Naime, može se desiti da se pritisci u presečnom čvoru i njemu susednom fiktivnom čvoru razlikuju tako da prikazuju da su u tom delu mreže javio skok pritiska u smeru tečenja vode. To bi bilo moguće da je tu postavljena pumpa što nije slučaj u ovom primeru.

Radi preglednosti rezultata dobijena rešenja za sve primenjene algortime su prikazana u tabeli 1 u nastavku. Primećuje se sličnost što je i očekivano budući da su vrednosti kriterijumske funkcije bliske.

Tabela 1 Pregled dobijenih rešenja za primenjene optimizacione algoritme

ID	L	n1	n2	D_{orig}	D_{opt1} - ΔQ	D_{opt2} - ΔQfix	D_{opt3} - ΔQvar
[/]	[m]	[/]	[/]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	3536	1	2	4.572	0	0	0
2	6035	2	3	4.572	0	0	0
3	2225	3	4	4.572	0	0	0
4	2530	4	5	4.572	0	0	0
6	5822	7	6	4.572	0	0	0
7	2926	8	7	3.353	3353	0	0
8	3810	9	8	3.353	0	0	0
9	2926	9	10	4.572	0	0	0
10	3414	11	9	5.182	0	0	0
11	4420	12	11	5.182	0	0	0
12	3719	13	12	5.182	0	0	0
13	7346	14	13	5.182	0	0	0
14	6431	15	14	5.182	0	0	0
15	4724	1	15	5.182	0	4.877	3.353
16	8047	10	17	1.829	2.438	1.219	2.134
17	9510	12	18	1.829	2.438	2.134	2.743
18	7315	18	19	1.524	2.134	2.743	2.134
20	11704	16	20	1.524	0	0	0
21	8047	9	16	1.829	1.829	1.829	1.829
22	2621	5	6'	4.572	0	0	0
23	4389	11	20'	1.524	1.829	1.524	1.829

4 Zaključak

Ubrzavanje proračuna evaluacione funkcije koja je integrisana u optimizacioni algoritam je ostvareno primenom ΔQ metode za proračun mreža pod pritiskom. Ispitane su tri varijante primene ove metode i za sve tri se može konstatovati da su dale zadovoljavajuće rezultate. Ostvareno ubrzanje optimizacionog algoritma je značajno u odnosu na primenu *EPANET*-a kao eksternog modula za hidraulički proračun. Ponoviće se da je u standardnoj primeni ΔQ metode, optimizacioni proračun 26 puta brži. Za dve modifikovane varijante koje su korišćene ubrzanje je 3 puta veće, odnosno optimizacioni proračun je 78 puta brži nego kad se koristi *EPANET*. Ova prednost je značajna, a pogotovo ima veću težinu pri optimizaciji velikih sistema sa nekoliko stotina, nekad i hiljada, elemenata.

U pogledu konvergencije genetskog algoritma pri primeni ovih metoda takođe su rezultati zadovoljavajući. Standardna primena ΔQ metode je dovela do poznatog globalnog optimuma, dok su dve ispitane modifikacije dale nešto skuplja rešenja. Neophodno je reći da su i ta skuplja, suboptimalna rešenja prihvatljiva jer su svega 3% (varijanta iz poglavlja 5) odnosno 4% (varijanta iz poglavlja 4) viša od globalnog minimuma.

Pristup korišćenju GA u kojima se koristi za hidraulički proračun ΔQ metoda, i gde se optimizacija izvršava nad fiktivnom granatom mrežom svakako ima potencijal za primenu u praksi. Neophodno je dalje ispitivati ovaj pristup, pogotovo na primerima projektovanja novih sistema. Posebno je interesantna varijanta gde su korekcije protoka ΔQ takođe predmet optimizacije. Dalja istraživanja će biti fokusirana na ovu modifikaciju primene ΔQ metode, gde postoji dosta prostora za ispitivanja načina optimizovanja vrednosti korekcija protoka, u cilju poboljšanja konvergencije GA ka suboptimalnim rešenjima.

Literatura

1. Ivetić D. (2012), *Optimizacija mreža pod pritiskom*, Građevinski Fakultet.
2. Michalewicz Z. (1996), *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag Berlin.
3. Sharma N. (2012), *Stochastic techniques used for optimization in solar systems*, Elsevier, Haamirpur.
4. Stanić M. (1999), *Optimizacija mreža pod pritiskom u sistemima za navodnjavanje*, Građevinski fakultet, Beograd 1999.
5. Stanić M., Vasilić Ž., Prodanović D., Branisavljević N., (2010), *Algoritmi za dekompizaciju, agregaciju i hidraulički proračun mreža pod pritiskom*, Zbornik radova sa 10. međunarodne konferencije "Vodovodni i kanalizacioni sistemi" Jahorina.
6. Walski T., Chase D., Savic D., Grayman W., Beckwith S., Koelle E. (2003), *ADVANCED WATER DISTRIBUTION MODELING AND MANAGEMENT*, Bentley Institute Press, 2003.