UDK: 532.58
Originalni naučni rad

HIDRAULIČKI PRORAČUN MREŽA POD PRITISKOM PRIMENOM TRIBAL – ΔQ METODE

Željko VASILIĆ, Miloš STANIĆ
Građevinski fakultet u Beogradu

REZIME

Za potrebe modeliranja mreža pod pritiskom u praksi se najčešće koristi EPANET softver, globalno priznat kao pouzdan i robustan. EPANET koristi formulaciju osnovnih jednačina koje opisuju tečenje u mrežama pod pritiskom poznatu kao metoda čvorova, za čije rešavanje se primenjuje metoda globalnog gradijenta (Global Gradient Algorithm – GGA). Alternativna formulacija metodi čvorova jeste formulacija metode prstenova (ΔQ metoda). Osnovna prednost formulacije metode prstenova je značajno manji broj nepoznatih veličina, što proizilazi iz činjenice da realne mreže imaju znatno manje prstenova nego čvorova. Osnovni nedostatak je neophodna identifikacija prstenova u mreži koja nije jednoznačna. U ovom radu je predstavljena nova metoda za hidraulički proračun mreža pod pritiskom (TRIBAL–ΔQ), zasnovana na novom algoritmu za brzu identifikaciju prstenova u mreži (TRIBAL) i efikasnoj implementaciji ΔQ metode za rešavanje osnovnih jednačina sistema. Cilj predstavljene metode je da iskoristi očigledne prednosti formulacije metode prstenova i prevaziđe poteškoće procesa identifikacije prstenova postojećih metoda baziranih na istoj formulaciji. TRIBAL–ΔQ metoda je testirana na četiri primera realnih mreža različite topologije i složenosti. Poseban akcenat je dat poređenju brzine proračuna TRIBAL–ΔQ metode sa GGA metodom implementiranom u EPANET. Rezultati ilustruju da, iako zahteva veći broj iteracija za konvergenciju, nova TRIBAL–ΔQ metoda ostvaruje istu preciznost proračuna uz bolju numeričku stabilnost sa značajnom uštedom računarskog vremena.

Ključne reči: hidraulički proračun, ΔQ metoda

UVOD

Hidraulički proračun mreže pod pritiskom za cilj ima određivanje rasporeda pritisaka i protoka u mreži. Sistem osnovnih jednačina koje opisuju tečenje u mrežama pod pritiskom se može formulisati na nekoliko načina, pri čemu osnovne nepoznate po kojima se rešava sistem mogu biti: (1) protoci u cevima (Q formulacija), (2) pijezometarske kote u čvorovima (H formulacija) i (3) korekcije protoka u prstenovima (ΔQ formulacija) [1]. Dodatno, prve dve formulacije se definišu kao metode čvorova, a treća kao metoda prstenova [2]. Metoda prstenova ima značajno manji broj nepoznatih od metoda čvorova, obzirom da realne mreže imaju znatno manje prstenova nego čvorova i cevi.

ΔQ formulacija problema, poznatija i kao ΔQ metod (ΔQ *method*) je prvi put predstavljena 1936 [3]. U literaturi se ova metoda može naći pod različitim imenima, kao što su *loop-flow* metoda [4,5] ili *loop equations* metoda [6]. ΔQ metoda je bila naročito popularna u periodu pre razvoja kompjuterskih tehnika zbog svoje jednostavnosti primene. Međutim, efikasnost njene primene u značajnoj meri zavisi od načina identifikacije prstenova u mreži koja nije jednoznačna [5]. Sa razvojem računara, H formulacija problema, poznatija kao metoda čvorova, je preuzela primat. Razlozi su jednostavni: (1) nije potrebno identifikovati prstenove u mreži, što može biti izuzetno kompleksan zadatak za realne mreže sa velikim brojem elemenata i (2) problem većeg broja nepoznatih, u poređenju sa metodom prstenova, je prevaziđen razvojem računarskih resursa. Posledično, svi raspoloživi softveri za analizu mreža pod pritiskom za hidraulički proračun koriste metodu čvorova, uključujući i EPANET [7], najpopularniji javno dostupan softverski paket. Konkretno, u EPANET je implementiran algoritam globalog gradijenta (Global Gradient Algorithm – GGA, [8]), poznatiji kao GGA metod. Dostupnost i robusnost EPANET-ovog izvornog koda rezultirali su njegovom primenom u mnogim komercijalno dostupnim softverskim rešenjima za analizu mreža pod pritiskom.

U prethodnom periodu istraživači su predložili različite metode i tehnike za hidruličko modeliranje bazirane na metodi čvorova u pokušaju da se dodatno unapredi predmetna oblast: RCTM metoda (Reformulated co-tree method) [9], FCPA metoda (Forest Core partitioning method) [10], GMPA algoritam (Graph Matrix partitioning algorithm)[11]. FCPA metoda vrši podelu mreže sa hidrauličkog aspekta na linearni deo (granati) i nelinearni deo (prstenasti), u pokušaju da se poveća računarska efikasnost proračuna. Ovo istraživanje je unapređeno razvojem GMPA algoritma koji dodatno vrši podelu prstenastog dela mreže. U svim istraživanjima je pokazano da je moguće ostvariti značajno povećanje računarske efikasnosti proračuna, tj. smanjeno vreme proračuna, u poređenju sa originalnom GGA formulacijom implementiranom u EPANET.

U mrežama koje sadrže značajan deo granatih delova, hidraulički proračun je jednostavniji primenom metode prstenova (ΔQ metod) nego metodom čvorova, obzirom da su početni i krajnji raspored protoka isti pa nema potrebe za iterativnim proračunom [12]. Istraživanje u okviru kojeg je predstavljena FCPA metoda takođe potvrđuje ovu činjenicu. Obzirom da realne mreže imaju značajno manji broj prstenova nego čvorova (npr. mreža BWNS2 opisana u [13] sadrži 12 527 čvorova i 2 308 prstenova) i da se mogu razviti efikasni algoritmi za brzu identifikaciju prstenova u mreži, ponovo se javilo interesovanje za istraživanje i unapređenje metoda za hidraulički proračun primenom ΔQ metode. Prednosti ΔQ metode u odnosu na metodu čvorova su prikazane u nekoliko istraživanja [14,15], naročito kada je hidraulički proračun neophodan u različitim optimizacionim procedurama [16]. ΔQ metoda je često kritikovana zbog potrebe za identifikacijom prstenova koja nije jednoznačna a može zahtevati dosta računarskih resursa pre samog postupka rešavanja osnovnih jednačina [5]. Takođe, topologija identifikovanih prstenova direktno utiče na strukturu matrice sistema koji se rešava, odnosno na njenu gustinu, pa samim tim i na jednostavnost rešavanja problema. Efikasna implementacija metode prstenova podrazumeva adresiranje dva zadatka: (1) identifikacija adekvatnog seta prstenova u mreži i (2) rešavanje jednačina po prstenovima.

Objavljeno je nekoliko istraživanja koja se bave tematikom identifikacije prstenova u mreži, sa ili bez aspekta hidrauličkog proračuna [17–20]. Zajedničko za sva istraživanja je da su bazirana na primeni različitih algoritma iz oblasti teorije grafova i usvojenih heuristika. Predstavljene metode su uglavnom testirane na mrežama iz literature, jednostavne topologije i malog broja elementa, pa se postavlja pitanje njihove primenljivosti za realne probleme.

Identifikacija prstenova je, kao što je ranije navedeno, samo prvi korak ka efikasnoj implementaciji ΔQ metode. Drugi je rešavanje osnovnih jednačina po nepoznatim korekcijama protoka za prstenove (ΔQ). Poređenje efikasnosti metode čvorova implementirane u EPANET (GGA metoda) i različitih formulacija metode prstenova (ΔQ metod) je prikazano u nekoliko istraživanja [5,14,19,21]. U istraživanju [5] prednost je data GGA metodi, međutim zaključci su izvedeni na osnovu jednostavnog primera sa samo tri prstena, i uporednog prikaza broja iteracija bez prikaza računarskog vremena. U istraživanju [21] direktno su poređena računarska vremena obe metode i neznatna prednost je data ΔQ metodi, sa opaskom da se ova prednost gubi sa porastom kompleksnosti mreže. Međutim, rezultati su proistekli iz analize 16 izrazito prstenastih generičkih mreža koje ne oslikavaju kompleksnost realnih sistema, a favorizuju GGA metodu. U istraživanju [14] ΔQ metoda je implementirana u isti kompjuterski jezik kao i GGA metoda, kako bi se omogućilo adekvatno poređenje metoda. Pokazano je da se mogu se mogu ostvariti značajna ubrzanja proračuna po iteraciji primenom ΔQ metode (do 5 puta), ali da se na nivou celokupne simulacije ovaj efekat gubi. Ovaj problem je posebno adresiran u radu koji se prikazuje ovde.

U ovom radu je predstavljen novi metod za hidraulički proračun u mrežama pod pritiskom, nazvan TRIBAL-ΔQ. Metod je razvijen kombinovanjem novog algoritma za brzu identifikaciju prstenova u mreži baziranog na triangulaciji (TRIangulation Based ALgorithm – TRIBAL) sa efikasnom implementacijom metode prstenova (ΔQ metoda). Osnovni doprinosi ovog istraživanja se ogledaju u: (1) razvoju efikasnog i robusnog algoritma za identifikaciju prstenova koji može biti primenjen i u drugim istraživačkim oblastima i (2) implementaciji ΔQ metode koja značajno smanjuje vremenski zahtevan postupak proračuna novih koeficijenata računske matrice sistema. U radu su prikazani rezultati testiranja TRIBAL-ΔQ metode na 4 realne mreže pod pritiskom, različite topologije i složenosti. Dat je uporedni prikaz efikasnosti nove implementacije ΔQ metode i originalne implementacije GGA metode u EPANET-u, kroz poređenje: (1) računarske efikasnosti proračuna (brzine), (2) konvergencije proračuna i (3) preciznosti proračuna. Da bi se obezbedilo adekvatno poređenje metoda (ΔQ i GGA), ΔQ metoda je implementirana direktno u izvorni kod EPANET-a.

TRIBAL-ΔQ METODOLOGIJA

TRIBAL-ΔQ metodologija predstavljena u ovom radu je primenljiva za hidraulički proračun mreža pod pritiskom pod sledećim uslovima:

1. Čvorna potrošnja ne zavisi od pritiska i
2. Topologija mreže ostaje nepromenjena tokom simulacije, odnosno promena statusa elemenata kao što su zatvarači nije dozvoljena.

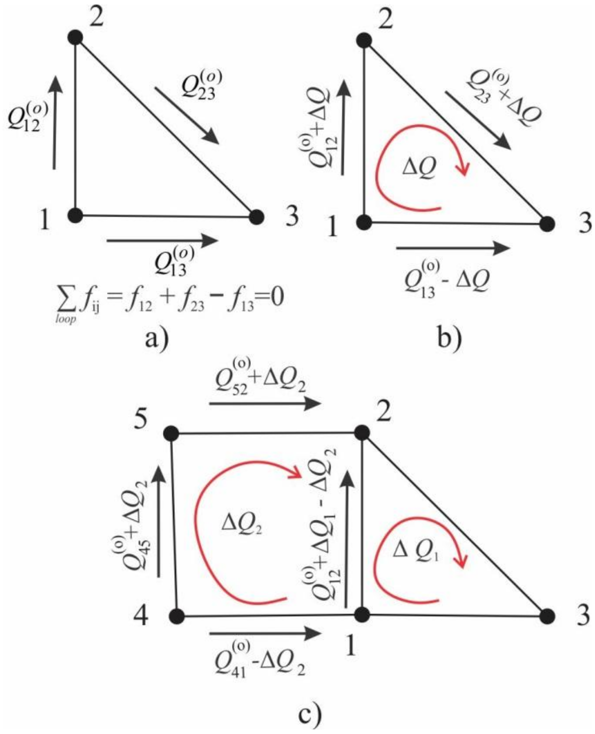
Cilj metodologije je omogućiti poboljšanje efikasnosti hidrauličkog proračuna sa aspekta utroška računarskog vremena, pod prethodno navedenim uslovima, pa je shodno tome najpogodnija za primenu u optimizacionim problemima koji zahtevaju veći broj uzastopnih simulacija na matematičkom modelu mreže (npr. dimenzionisanje mreže i analiza pouzdanosti). Opis metodologije je dat u narednim poglavljima: najpre se daje kratak pregled teorijskih osnova metode prstenova (ΔQ metode), zatim je dat opis algoritma za identifikaciju prstenova u mreži (TRIBAL) i konačno je opisan postupak implementacije metodologije.

ΔQ METODA

ΔQ metoda, originalno prikazana u istraživanju [3], je zasnovana na primeni zakona održanja energije po prstenovima u mreži. Osnovni postulat je da suma gubitaka energije po zatvorenoj konturi prstena ($\Sigma f_{ij} = 0$) mora biti jednaka nuli. Za proračun gubitaka energije u cevima može se koristiti Darcy-Weisbach (DW) ili Hazen-Williams (HW) jednačina. Najpre je potrebno odrediti inicijalni raspored protoka u mreži ($Q_{ij}^{(0)}$) koji mora zadovoljiti jednačinu kontinuiteta u čvorovima (slika 1-a). Inicijalni protoci se moraju iterativno korigovati sa korekcijama protoka ΔQ (slika 1-b), dok se ne odredi konačan raspored protoka u svim prstenovima mreže koji će zadovoljiti i zakon održanja energije. Slika 1-c prikazuje dva prstena koji dele zajedničku vezu 1-2. Jednačina zakona održanja energije za prsten sa korekcijom protoka ΔQ_2 na ovoj slici glasi:

$$
\begin{aligned}
f_2\left(\Delta Q_1, \Delta Q_2\right) = {} & R_{45}\left(Q_{45}^{(o)} + \Delta Q_2\right)\left|Q_{45}^{(o)} + \Delta Q_2\right|^{n-1} \\
& + R_{52}\left(Q_{52}^{(o)} + \Delta Q_2\right)\left|Q_{52}^{(o)} + \Delta Q_2\right|^{n-1} \\
& - R_{12}\left(Q_{12}^{(o)} + \Delta Q_1 - \Delta Q_2\right)\left|Q_{12}^{(o)} + \Delta Q_1 - \Delta Q_2\right|^{n-1} \\
& - R_{41}\left(Q_{41}^{(o)} - \Delta Q_2\right)\left|Q_{41}^{(o)} - \Delta Q_2\right|^{n-1} = 0
\end{aligned}
\tag{1}
$$

gde je R_{ij} koeficijent otpora za vezu ij. Jednačina (1) je nelinearna i broj takvih jednačina za celu mrežu odgovara broju prstenova u mreži. Usvajajući sledeće oznake za elemente u mreži – broj čvorova (Nn),broj veza (Nl), broj izvorišnih čvorova (Nr) i broj nezavisnih komponenti u razmatranoj mreži (c) – broj nelinearnih jednačina koje je potrebno rešiti je $N = N_L + N_{PL}$, gde je $N_L = Nl - Nn + c$ broj prstenova a $N_{PL} = Nr - 1$ je broj fiktivnih prstenova u mreži. Fiktivni prstenovi se formiraju između čvorova sa poznatom pijezometarskom kotom (npr. rezervoara). U svakom slučaju, ukupan broj prstenova u mreži N se može izraziti i odrediti kao $N = Nl - Nj$, gde je Nj broj čvorova koji nisu rezervoari [22].



Slika 1. Osnove ΔQ metode

Ukupno N jednačina tipa (1) čine nelinearni sistem jednačina koji se rešava po nepoznatim korekcijama protoka za sve prstenove u mreži. Sistem se može napisati u matričnoj formi kao:

$$
\begin{aligned}
& \mathbf{f}(\mathbf{\Delta Q}) = \\
& = \mathbf{M}\left[\mathbf{R} \circ \left(\mathbf{Q_o} + \mathbf{M}^T\mathbf{\Delta Q}\right) \circ \left|\mathbf{Q_o} + \mathbf{M}^T\mathbf{\Delta Q}\right|^{\circ(n-1)} - \mathbf{A_o}^T\mathbf{H_o}\right]
\end{aligned}
\tag{2}
$$

gde je $\mathbf{M}$ matrica povezanosti veza u prstenovima veličine $[N,Nl]$ u kojoj su članovi M_{ij}=1 ukoliko je smer uvedene korekcije protoka ΔQ za i-ti prsten isti kao smer inicijalnog protoka u *j*-toj vezi, M_{ij}=-1 u suprotnom slučaju i M_{ij}=0 ukoliko *j*-ta veza nije deo *i*-tog prstena; **R** je vektor koeficijenata otpora veličine [*Nl,1*]; $\mathbf{Q_o}$ je vektor inicijalnih protoka veličine [*Nl,1*]; $\Delta\mathbf{Q}$ je vektor korekcija protoka veličine[*N,1*]; $\mathbf{A_o}$ je matrica povezanosti mreže svedena na čvorove sa poznatom pijezometarskom kotom veličine [*Nr,Nl*]; $\mathbf{H_o}$ je vektor poznatih pijezometarskih kota veličine [*Nr,1*]; *n* je eksponent protoka koji iznosi 1.852 kada se koristi HW jednačina za proračun gubitaka energije, ili 2.0 kada se koristi DW jednačina; operator ○ je Hadamard-ov operator koji označava matrične operacije po elementima (npr. $\mathbf{E}=\mathbf{F}\circ\mathbf{G}$, gde je $\mathbf{E}_{ij}=\mathbf{F}_{ij}\mathbf{G}_{ij}$).

Linearizacijom sistema jednačina Newton-Raphson metodom dobija se formulacija za iterativno određivanje vektora korekcija protoka u prstenovima:

$$\Delta\mathbf{Q}_{i+1} = \Delta\mathbf{Q}_i - \mathbf{J}_i^{-1}\mathbf{f}_i \tag{3}$$

gde je *i* redni broj iteracije a **J** iterativna matrica veličine [*N,N*], poznatija kao matrica Jakobijana koja sadrži sve izvode energetskih jednačina za prstenove po odgovarajućim korekcijama protoka, tj. $\mathbf{J}(m,k) = \partial f_m / \partial\Delta Q_k$. Vektor $\mathbf{f}_i$ je vektor reziduala koji se računa na osnovu vektora $\Delta\mathbf{Q}_i$ i jednačine (2). Nakon što se zadovolji zahtevana tačnost proračuna, konačan raspored protoka u prstenastom delu mreže se određuje ažuriranjem vektora inicijalnih protoka relacijom:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q_o} + \mathbf{M}^T\Delta\mathbf{Q} \tag{4}$$

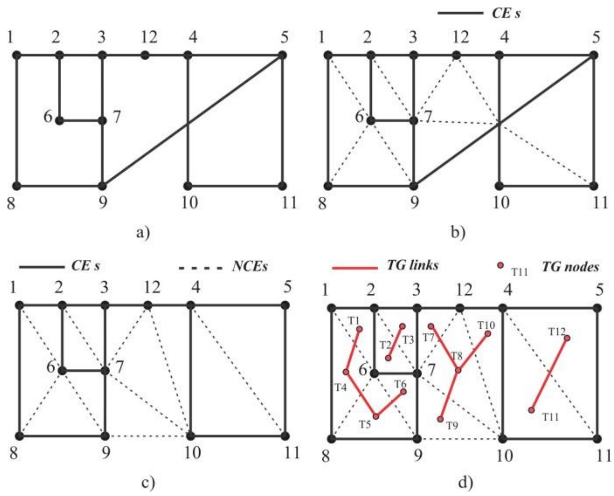
Određivanje rasporeda protoka u granatim delovima mreže je trivijalno, obzirom da je početni raspored protoka ujedno i konačni i nema potrebe za iterativnim proračunom.

U poređenjima sa GGA formulacijom sistema osnovnih jednačina, ΔQ formulacija je često kritikovana [5] zbog veće gustine matrice Jakobijana (**J**). Međutim, gustina ove matrice je direktno zavisna od strukture identifikovanih prstenova koja nije jednoznačna [14]. Prostija struktura prstenova implicira da će jednačina energetskih gubitaka po prstenu (*f*) biti funkcija manjeg broja nepoznatih korekcija protoka. Samim tim i matrica Jakobijana (izvoda) će biti ređa i dijagonalno dominantnija.

Obzirom na prethodnu diskusiju jasno je da je od interesa razviti algoritam koji je u stanju da na računarski efikasan način identifikuje što prostiju strukturu prstenova u mreži. Algoritam koji je razvijen za potrebe ovog istraživanja je prikazan u narednom poglavlju.

TRIBAL ALGORITAM ZA IDENTIFIKACIJU PRSTENOVA

Algritam za identifikaciju prstenova u mreži (TRIBAL) je deo faze predprocesiranja u okviru TRIBAL-ΔQ metodologije. Za razliku od postojećih metoda koje su uglavnom bazirane na teoriji grafova i raznim empirijskim relacijama [14,17,18], TRIBAL algoritam je baziran teoriji grafova i Delaunay algoritmu za triangulaciju skupa tačaka (DT). Za skup tačaka u ravni (planarni skup), DT algoritam kreira mrežu trouglova koji povezuju te tačke uz uslov da opisani krug oko bilo kog trougla ne sadrži ni jednu tačku skupa. U ovom istraživanju je primenjena uslovljena Delaunay-eva triangulacija (*Constrained Delaunay Triangulation* – CDT), koja podrazumeva da se unapred definišu obavezne stranice mreže trouglova [23]. Koraci TRIBAL algoritma su objašnjeni u nastavku koristeći ilustrativni primer sa 12 tačaka i 15 veza prikazan na slici 2-a. Broj prstenova u ovoj mreži, prema opštoj relaciji za proračun definisanoj u opisu ΔQ metode, iznosi 15-12+1=4.



Slika 2. TRIBAL algoritam

Koraci algoritma su sledeći:

1. **Uklanjanje granatih delova mreže.**
   Obzirom da u realnim mrežama postoji značajan deo granatih delova mreže koji nisu od interesa prilikom određivanja prstenova, ovaj korak se primenjuje kako bi se smanjio skup tačaka na kojima će se primeniti CDT algoritam. U konkretnom primeru sa slike 2 nema granatih delova mreže, pa se ovaj korak može preskočiti.

2. **Definisanje obaveznih veza stranica trouglova i pokretanje CDT algoritma**
   Obavezne veze su sve veze u mreži. Rezultat CDT algoritma za triangulaciju je mreža trouglova u kojoj je svaki trougao definisan sa dva skupa: skupa čvorova i skupa veza koje čine trougao. Rezultat primene CDT algoritma na razmatranom primeru je ilustrovan na slici 2-b, na kojoj su punim linijama prikazane obavezne veze (CEs) a isprekidanim sve ostale veze triangulacije.

3. **Modifikacija triangulacije u slučaju da mreža nije planarna.**
   Ukoliko mreža nije planarna, to znači da postoje obavezne veze koje se međusobno seku, što je čest slučaj u realnim mrežama. U tom slučaju se identifikuju presečne veze, i jedna od tih veza se uklanja iz triangulacije i čuva za kasnije korake algoritma. Dakle, nema potrebe za ponovnom triangulacijom. U konkretnom primeru veze 4-10 i 9-5 se međusobno presecaju u jednoj tački. Veza 9-5 se označava kao presečna, i uklanja iz triangulacije zajedno sa presečnom tačkom, što rezultuje modifikovanom verzijom CDT triangulacije (slika 2-c).

4. **Identifikacija neobaveznih veza CDT triangulacije.**
   Neobavezne veze triangulacije (NCEs) se određuju jenostavno kao razlika skupa svih veza i skupa veza koje se nalaze u skupu CEs (slika 2-c). Ove veze su označene isprekidanim linijama.

5. **Kreiranje grafa koji čine trouglovi CDT triangulacije**
   Svi trouglovi CDT triangulacije se predstavljaju čvorovima (npr. T1 na slici 2-d) koji se povezuju preko neobaveznih veza (NCEs), čime se dobijaju granati grafovi trouglova koji ne moraju biti međusobno povezani. Konkretno, na slici 2-d je prikazano 12 trouglova identifikovanih u procesu CDT triangulacije označenih sa oznakama T1-T12. Identifikovana su ukupno 4 granata grafa trouglova – (T1, T4, T5 i T6), (T2, T3), (T9, T8, T7, T10) i (T11, T12).

6. **Identifikacija spoljnih grafova trouglova i njihovo uklanjanje.**
   Spoljni grafovi nisu ograničeni sa svih strana obaveznim vezama triangulacije (CEs) i samim tim nisu od interesa za dalji postupak, jer njihove sranice ne čine veze koje su deo prstenova u mreži. Ovakvi grfovi se uklanjanju iz daljeg postupka, i u konkretnom slučaju takav graf je onaj sačinjen od trouglova T9, T8, T7 i T10.

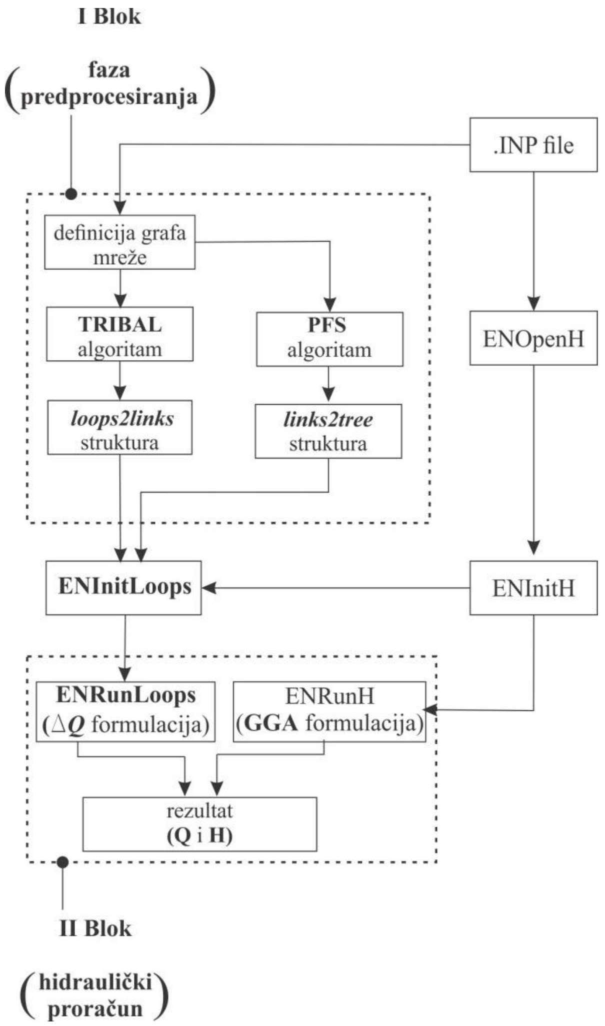
7. **Agregacija unutrašnjih grafova trouglova u prstenove.**
   Breadth First Search (BFS) algoritam iz teorije grafova [24] se primenjuje da se svaki unutrašnji graf trouglova agregira, propagacijom od jednog krajnjeg čvora tog grafa. Unija obaveznih veza (CEs) agregiranih trouglova predstavlja prsten u mreži. Obzirom da je agregacija izvršena na uređenom povezanom grafu, veze u prstenu su topološki sortirane u odgovarajućem redosledu. U primeru sa slike 2-d na opisani način su formirana 3 prstena koji čine veze: 1. (6-2, 2-1, 1-8, 8-9, 9-7, 7-6); 2. (2-6, 6-7, 7-3, 3-2); 3. (4-10, 10-11, 11-5, 5-4).

8. **Identifikacija prstenova koje čine presečne veze.**
   Ukoliko su u trećem koraku algoritma identifikovane presečne veze, potrebno je odrediti i prstenove kojima one pripadaju. Za ovu svrhu koristi se propagacija BFS algoritamom od jednog do drugog čvora ovakve veze koja će odrediti putanju između krajnjih čvorova presečne veze. Identifikovane veze, zajedno sa presečnom vezom čine prsten. Poslednji (četvrti) prsten u konkretnom primeru je identifikovan propagacijom od čvora 5 do čvora 9 (ranije je identifikovana veza 9-5 kao presečna) i čine ga veze (5-4, 4-12, 12-3, 3-7, 7-9, 9-5).

9. **Identifikacija fiktivnih prstenova.**
   Identifikacija fiktivnih prstenova se vrši još jednom propagacijom BFS algoritmom od jednog izvornog čvora (rezervoara) do svih ostalih u mreži. Na ovaj način je zagarantovana minimalna dužina fiktivnih prstenova, obzirom da je to jedna od karakteristika BFS algoritma. U konkretnom primeru nema fiktivnih prstenova.

IMPLEMENTACIJA TRIBAL-ΔQ METODE

Implementacija TRIBAL-ΔQ metode je podeljena na dve celine, odnosno dva bloka, ko što je shematski prikazano na slici 3. U prvoj fazi se primenjuje prethodno opisan TRIBAL algoritam za identifikaciju prstenova u mreži, dok se u drugoj fazi vrši hidraulički proračun primenom ΔQ metode. ΔQ metoda je implementirana u izvorni računarski kod softvera EPANET (C jezik), kako bi se omogućilo adekvatno poređenje sa GGA metodom za rešavanje jednačina sistema.



Slika 3. Shema implementacije TRIBAL-ΔQ metode

U fazi predprocesiranja se na osnovu podataka o mreži, sadržanih u ulaznoj datoteci EPANET formata (.INP), vrše pripremne operacije i kreiranje dodatnih struktura podataka neophodnih za kasniji hidraulički proračun. Najpre se kreira predstava mreže u vidu grafa, a zatim definišu dve strukture podataka: *loops2links* i *links2tree*. *Loops2links* struktura podataka se definiše na osnovu rezultata TRIBAL algoritma za identifikaciju prstenova i sadrži podatke o svim prstenovima u mreži. *Links2tree* struktura podataka je rezultat propagacije kroz mrežu modifikovanim BFS algoritmom (Priority First Search - PFS algoritam). Primenom PFS algoritma propagacija kroz mrežu se vrši vezama sa minimalnom vrednošću koeficijenta otpora *R*. Na taj način se identifikuje razapinjuće stablo u mreži sa najmanjim otporom tečenju.

Hidraulički proračun se obavlja u drugoj fazi/bloku (slika 3), primenom nativne GGA metode sadržane u EPANET softveru, ili ovde opisane ΔQ metode koja je naknadno implementirana u računarski kod. Funkcije *ENOpenH*, *ENInitH* i *ENRunH* su funkcije koje već postoje u računarskom izvornom kodu, dok su dodate dve nove funkcije neophodne za implementaciju ΔQ metode – *ENInitLoops* i *ENRunLoops*. Funkcija *ENInitLoops* koristi strukture podataka kreirane u fazi predprocesiranja (*loops2links* i *links2tree*) da alocira dodatnu računarsku memoriju neophodnu za hidraulički proračun. Funkcija *ENRunLoops* vrši hidraulički proračun baziran na ΔQ metodi. Nakon što se sistem nelinearnih jednačina reši po nepoznatim vrednostima promenljivih, određuju se konačni raspored protoka (Q) i pritisaka (H) u mreži kao konačni rezultat hidrauličkog proračuna.

Implementacija ΔQ metode na prethodno opisan način u izvorni kod EPANET-a omogućava računarski brz i efikasan hidraulički proračun. Započinje sa određivanjem inicijalnog rasporeda protoka u mreži ($Q_{ij}^{(0)}$) propagacijom unazad kroz razapinjuće stablo, sadržano u strukturi podataka *links2tree*, primenjujući jednačinu kontinuiteta u čvorovima. U cevima koje nisu deo razapinjućeg stabla, inicijalni protoci se određuju na osnovu brzine od 1 ft/s, a zatim se svi inicijalni protoci u mreži ažuriraju da se osigura zadovoljenje jednačine kontinuiteta.

Za proračun elemenata matrice izvoda (Jakobijanove matrice **J**) koristi se originalna EPANET-ova funkcija *newcoeff*. Funkcija *newcoeff* za potrebe GGA metode određuje inverzne izvode funkcije gubitka energije u svakoj cevi (f_{ij}) po protoku u toj cevi (Q_{ij}), na sledeći način:

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial f_{ij}}{\partial Q_{ij}}\right)^{-1} &= \left(\frac{\partial}{\partial Q_{ij}}\left(R_{ij}Q_{ij}\left|Q_{ij}\right|^{n-1}\right)\right)^{-1} \\ &= \left(R_{ij}\left(Q_{ij}\left(n-1\right)\left|Q_{ij}\right|^{n-2}\frac{\left|Q_{ij}\right|}{Q_{ij}}+\left|Q_{ij}\right|^{n-1}\right)\right)^{-1} \\ &= \frac{1}{nR_{ij}\left|Q_{ij}\right|^{n-1}}\end{aligned} \tag{5}$$

Za primenu ΔQ metode neophodno je odrediti izvode funkcije gubitka energije (f_{ij}) po nepoznatim korekcijama protoka u prstenovima (ΔQ_k):

$$\frac{\partial f_{ij}}{\partial \Delta Q_k} = \frac{\partial}{\partial \Delta Q_k}\left(R_{ij}\left(Q_{ij}^{(0)}+\Delta Q_k\right)\left|Q_{ij}^{(0)}+\Delta Q_k\right|^{n-1}\right)$$
$$= R_{ij}\left(\begin{array}{l}\left|Q_{ij}^{(0)}+\Delta Q_k\right|^{n-1}+\\ \left(Q_{ij}^{(0)}+\Delta Q_k\right)(n-1)\left|Q_{ij}^{(0)}+\Delta Q_k\right|^{n-2}\dfrac{\left|Q_{ij}^{(0)}+\Delta Q_k\right|}{Q_{ij}^{(0)}+\Delta Q_k}\end{array}\right) \quad (6)$$
$$= nR_{ij}\left|Q_{ij}^{(0)}+\Delta Q_k\right|^{n-1}$$

U obe varijante proračuna, GGA metodom dato jednačinom (5) i ΔQ metodom dato jednačinom (6), koeficijenti matrice Jakobijana se moraju računati u svakoj iteraciji, obzirom da su koeficijenti R_{ij} zavisni od brzine odnosno protoka u cevi. Kako je $Q_{ij}^{(0)}+\Delta Q_k = Q_{ij}$, lako je zaključiti da je jednačina (6) u stvari inverzna vrednost jednačine (5). Ova činjenica omogućava korišćenje originalne *newcoeff* funkcije za proračun elemenata matrice Jakobijana i u slučaju ΔQ metode. Olakšavajuća okolnost je što se izvodi dati jednačinom (6) mogu sračunati na početku iteracije samo jednom za sve cevi, čime se značajno štedi na utrošku računarskog vremena. Elementi matrice Jakobijana se određuju prostim sabiranjem izvoda definisanih jednačinom (6) po cevima koje čine prsten – $\mathrm{J}(m,k) = \partial f_m / \partial \Delta Q_k = \sum_{ij\in m} \partial f_{ij} / \partial \Delta Q_k$.

Nakon svake iteracije ažuriraju se protoci u cevima (vektor **Q**) relacijom datom jednačinom (4) i koeficijenti za cevi dati jednačinom (6) se preračunavaju. Koeficijenti se preračunavaju samo za cevi koje su deo prstenova, za razliku od originalne GGA implementacije u EPANET-u gde se koeficijenti moraju računati za sve cevi u svakoj iteraciji obzirom da se radi o metodi čvorova. Na ovaj način se dodatno štedi računarsko vreme, obzirom da u realnim mrežama postoji veliki broj cevi koje nisu deo prstenova, već su deo granatog dela mreže.

Iterativni proračun se sprovodi dok se ne ostvari usvojena tačnost proračuna (*eps*). Kriterijum konvergencije usvojen u ovom istraživanju je isti kao onaj u originalnom EPANET softveru – odnos sume apsolutnih promena protoka u dve uzastopne iteracije i sume apsolutnih protoka u svim cevima mora biti manji od definisane tačnosti (*eps*):

$$eps = \frac{\sum_{ij=1}^{Nl}\left|Q_{ij}^{it+1}-Q_{ij}^{it}\right|}{\sum_{ij=1}^{Nl}\left|Q_{ij}^{it+1}\right|} \quad (7)$$

Nakon određivanja konačnog rasporeda protoka u mreži (**Q**), raspored pritisaka (**H**) se određuje koristeći razapinjuće stablo sadržano u strukturi *links2tree*.

TEST PRIMERI

Četiri različite, javno dostupne mreže (slika 4) su korišćene u svrhu testiranja, validacije tačnosti, i poređenja TRIBAL-ΔQ metode sa originalnom GGA metodom implementiranom u EPANET softveru.

Slika 4. Test primeri mreža: a) MOD, b) BIN, c) C-TOWN i d) WCR

Ulazne dadoteke u EPANET formatu za mreže Modena (MOD), Balerma Irrigation Network (BIN) i Wolf Cordera Ranch (WCR) su preuzete sa sajta Univerziteta u Eksiteru [25], dok je datoteka za mrežu C-TOWN preuzeta sa sajta Water-Simulation [26].

Kao što se sa slike 4 može zaključiti, sve 4 mreže se izrazito razlikuju po topologiji, broju i tipu elemenata koje sadrže. Osnovne karakteristike mreža su sumirane u tabeli 1. Parametar L_{factor} u tabeli 1 pokazuje stepen zastupljenosti prstenastih delova mreže i računa se kao odnos broja veza koje se nalaze u prstenovima i ukupnog broja veza u mreži. Vrednost parametra uzima vrednosti između 0, ukoliko je mreža granata, i 1 ukoliko je mreža u potpunosti prstenasta. Tabela 1 ilustruje da je mreža MOD u potpunosti prstenasta, odnosno da nema granatih delova.

Tabela 1. Osnovne karakteristike mreža koje su korišćene kao test primeri

Mreža	MOD	BIN	C-town	WCR
# Čvorova (*Nn*)	272	447	396	1786
# Veza (*Nl*)	317	454	444	1995
# Prstenova (*N*)	49	11	56	213
# Rezervoara (*Nr*)	4	4	8	4
# Pumpi	0	0	11	6
# Zatvarača	0	0	4	4
# Veza u prstenovima	317	162	289	1173
L_{factor}	1	0.36	0.65	0.59

KRITERIJUMI ZA POREĐENJE

Za poređenje TRIBAL-ΔQ metode i GGA metode implementirane u EPANET usvojeni su sledeći kriterijumi:

1. **Računarska efikasnost proračuna.**
   Računarska efikasnost se ocenjuje na osnovu računarskog vremena potrebnog da se obavi simulacija hidrauličkog proračuna. Osnovni fokus istraživanja je na poređenju efikasnosti 2 različite metode za rešavanje jednačina sistema, GGA metode i ΔQ metode (II blok na slici 3). Računarsko vreme potrebno za identifikaciju prstenova TRIBAL algoritmom je prikazano zasebno.
2. **Konvergencija proračuna.**
   Konvergencija proračuna se ocenjuje na osnovu broja iteracija potrebnog da se zadovolji definisana tačnost proračuna (*eps*).
3. **Tačnost proračuna.**
   Tačnost proračuna novom implemetacijom ΔQ metode je ocenjena na osnovu razlike u predikciji protoka i pritisaka u mreži, u poređenju sa GGA metodom, usvojenom kao etalon u inženjerskoj praksi.

U istraživanju su, radi validacije rezultata, korišćene tri različite zahtevane tačnosti proračuna, odnosno uslova konvergencije (*eps*).

REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju su prikazani rezultati testiranja TRIBAL-ΔQ metode na 4 usvojena test primera. Radi lakšeg sagledavanja rezultati su prikazani prema redosledu usvojenih kriterijuma za poređenje.

Računarska efikasnost proračuna

Najpre se diskutuje računarska efikasnost TRIBAL algoritma za identifikaciju prstenova u mreži (I blok na slici 3). Računarska vremena za identifikaciju prstenova u mrežama MOD, BIN i C-TOWN su manja od 1 s, dok je za mrežu WCR vreme proračuna 5 s. Rezultati potvrđuju da su vremena proračuna relativno kratka, naročito kada se uzme u obzir da je identifikaciju prstenova potrebno obaviti samo jednom ukoliko se topologija mreže ne menja.

Obzirom da su računarska vremena hidrauličkog proračuna primenom obe metode, ΔQ i GGA, izuzetno kratka, prikazana vremena proračuna su određena na osnovu 10 ciklusa od 10 000 uzastopnih simulacija. Dobijena vremena po ciklusima su osrednjena i prikazana u tabelama i graficima u nastavku.

Računarska vremena za obe metode i tri različite zahtevane tačnosti proračuna (*eps*) su prikazana u tabeli 2. U slučaju WCR mreže proračun GGA metodom je numerički nestabilan za tačnosti proračuna veće od 10^{-3}, usled čega ova vremena nisu prikazana.

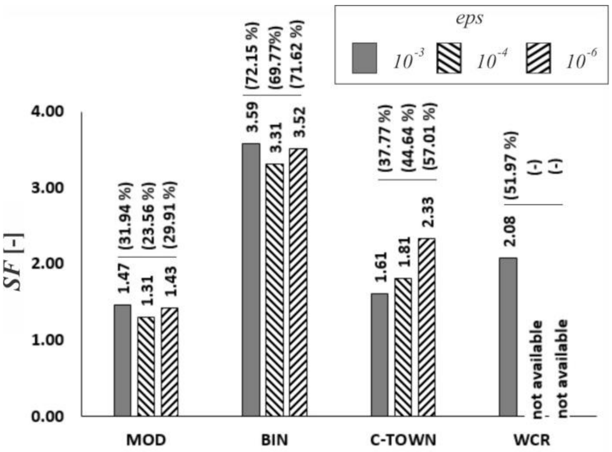
Tabela 2. Računarska vremena proračuna u [s], za tri različite zahtevane tačnosti proračuna (*eps*)

eps	metoda	Mreža			
		MOD	BIN	C-TOWN	WCR
10^{-3}	GGA	1.91	4.38	2.33	13.43
	ΔQ	1.3	1.22	1.45	6.45
10^{-4}	GGA	1.91	4.4	2.89	-
	ΔQ	1.46	1.33	1.6	7.25
10^{-6}	GGA	2.24	5.18	4.21	-
	ΔQ	1.57	1.47	1.81	8.1

Radi jednostavnosti poređenja računarskih vremena dve metode, određeni su faktor ubrzanja (*SF* [-]) i relativna ušteda vremena (*TS* [%]) kao:

$$SF = \frac{t(GGA)}{t(\Delta Q)}$$
$$TS = \frac{t(GGA) - t(\Delta Q)}{t(GGA)}100 \quad (8)$$

Vrednosti pokazatelja *SF* i *TS* su prikazani grafički na slici 5.



Slika 5. Ostvarena ubrzanja proračuna primenom ΔQ metode, izražena kroz pokazatelje *SF* i *TS*

Sa slike 5 se može zaključiti da se vrednosti ostvarenih faktora ubrzanja (*SF*) primenom ΔQ metode, za testirane mreže, kreću u rasponu 1.30 – 3.59, a vremenska ušteda (*TS*) u rasponu 23.56 – 72.15 %. Očekivano, najveće ubrzanje proračuna je ostvareno za BIN mrežu, koja ima najmanje prstenova i vrednost faktora $L_{factor} = 0.36$. Prikazani rezultati dodatno dobijaju na značaju ukoliko se napravi poređenje sa drugim istraživanjima u kojima su vršena poređenja GGA metode sa drugim metodama. Ostvarena ubrzanja hidrauličkog proračuna FCPA metodom [10], u odnosu na GGA metodu se kreću u rasponu 1.11 – 1.31, dok se ubrzanja ostvarena metodom prstenova predstavljenom u [14] kreću u rasponu 1.13 – 1.32. U istraživanju [10] je, kao i ovde, korišćena WCR mreža i prikazano je da se FCPA metodom ostvaruje relativna ušteda računarskog vremena od 14.5 %, u odnosu na GGA metodu. Ista mreža je korišćena i za poređenje RCTM metode sa GGA metodom [9]. Ostvaren je faktor ubraznja od 1.50, u poređenju sa GGA metodom. Implementacija ΔQ metode prikazana u ovom radu pokazuje bolje rezultate u odnosu na oba prethodno navedena istraživanja, obzirom da je za istu mrežu (WCR) ostvarena ušteda računarskog vremena od 52.0 % tj. ubrzanje od 2.08 puta, izraženo kroz *SF* (slika 5). Da bi se dodatno iskazali uzroci ubrzanja ostvarenih u ovom radu, u tabeli 3 su ilustrovane prednosti TRIBAL algoritma za identifikaciju prstenova koje se direktno odražavaju na efikasnost hidrauličkog proračuna ΔQ metodom.

Tabela 3. Broj NZEs elemenata u faktorizovanoj matrici Jakobijana

Mreža	Metoda		
	GGA	ASL-ΔQ	TRIBAL-ΔQ
MOD	958	445	280
BIN	1039	29	27
C-TOWN	1034	213	187
WCR	5021	1959	899

U tabeli je prikazan broj elemenata različitih od nule (NZEs) u faktorizovanoj matrici Jakobijana za tri različite metode hidrauličkog proračuna: (1) GGA metode, (2) ΔQ metode koja koristi proizvoljan set prstenova (ASL- ΔQ) i (3) ΔQ metode koja koristi set prstenova određen primenom TRIBAL algoritma (TRIBAL-ΔQ). Proizvoljan set prstenova (ASL) je određen propagacijom BFS algoritmom kroz mrežu od izvornog čvora da bi se odredilo razapinjuće stablo, pri čemu ostale veze koje nisu deo razapinjućeg stabla formiraju prstenove. Jasno je u svim slučajevima da TRIBAL- ΔQ metoda ima najređu matricu, usled čega se, između ostalog, i ostvaruju prikazana ubrzanja proračuna.

Konvergencija proračuna

U tabeli 4 je prikazano poređenje ΔQ i GGA metoda izraženo kroz broj broj iteracija (# it), vreme proračuna po iteraciji (t_iter) i ubrzanje po iteraciji (*SF*_it). Prikazani rezultati su dobijeni za zahtevanu tačnost proračuna $eps = 10^{-3}$. Ova tačnost je izabrana jer za veće tačnosti GGA metoda ne konvergira za WCR mrežu (tabela 2).

Iz rezultata se može zaključiti da GGA metoda obično konvergira konačnom rešenju u manjem broju iteracija, osim za BIN mrežu gde obe metode zahtevaju 6 iteracija. Međutim ovo se ne odražava na konačnu računarsku efikasnost metode, jer rezultati prikazuju da ΔQ metoda ostvaruje značajno kraća vremena proračuna po iteraciji.

Tabela 4. Broj iteracija (# it), vreme proračuna po iteraciji (t_iter) i ubrzanje po iteraciji (*SF*_it)

		Mreža			
		MOD	BIN	C-TOWN	WCR
t	GGA	1.91	4.38	2.33	13.43
[s]	ΔQ	1.3	1.22	1.45	6.45
# it	GGA	5	6	5	6
	ΔQ	7	6	7	7
t_iter	GGA	0.038	0.073	0.047	0.224
[ms]	ΔQ	0.019	0.02	0.021	0.092
*SF*_it		2.06	3.59	2.25	2.43

Tačnost proračuna

U tabeli 5 je prikazana tačnost hidrauličkog proračuna koju ostvaruje TRIBAL-ΔQ metoda. Tačnost je ocenjena kroz razlike u rezultatima u odnosu na GGA metodu, za definisani kriterijum konvergencije $eps=10^{-4}$. Rezultati nisu prikazani za WCR mrežu, obzirom da za usvojeni kriterijum konvergencije GGA metoda ne konvergira rešenju. U tabeli su prikazana četiri kriterijuma: (1) maksimalna razlika u određenim pritiscima (Δp_{MAX}), (2) prosečna razlika u pritiscima ($\left|\overline{\Delta p}\right|$), (3) maksimalna razlika u određenim protocima (ΔQ_{MAX}) i (4) prosečna razlika u protocima ($\left|\overline{\Delta Q}\right|$).

Tabela 5. Razlike u pritiscima i protocima određenih ΔQ metodom, u poređenju sa GGA metodom

kriterijum	Mreža		
	MOD	BIN	C-TOWN
Δp_{MAX} (m)	0.010 (0.017 %)	0.026 (0.022 %)	0.410 (0.283 %)
$\left\|\overline{\Delta p}\right\|$ (m)	0.004 (0.006 %)	0.007 (0.007 %)	5 x 10-5 (4 x 10-5 %)
ΔQ_{MAX} (L/s)	5 x 10-5 (0.008 %)	0.067 (0.022 %)	0.014 (0.957 %)
$\left\|\overline{\Delta Q}\right\|$ (L/s)	4 x 10-6 (0.001 %)	0.002 (0.022 %)	0.001 (0.002 %)

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5 se može zaključiti da TRIBAL-ΔQ metoda ostvaruje gotovo identične rezultate kao i referentna GGA metoda implementirana u EPANET softverskom paketu.

ZAKLJUČAK

U radu je predstavljena TRIBAL-ΔQ metoda za hidraulički proračun u mrežama pod pritiskom. Metoda je implementirana u 2 faze: (1) u prvoj se koristi TRIBAL algoritam za identifikaciju prstenova u mreži; (2) u drugoj se za hidraulički proračun koristi efikasna i poboljšana implementacija ΔQ metode. ΔQ metoda je implementirana direktno u softverski paket EPANET kako bi se omogućilo ravnopravno poređenje sa referentnom GGA metodom. TRIBAL-ΔQ metoda je testirana na četiri mreže različite topologije i složenosti, kako bi se izvršila validacija predstavljenje metode i poređenje sa GGA metodom.

Poređenje TRIBAL-ΔQ i GGA metoda za hidraulički proračun je izvršeno kroz 3 usvojena kriterijuma: (1) računarske efikasnosti proračuna, (2) konvergencije proračuna i (3) tačnosti proračuna. Rezultati proračuna upućuju na sledeće zaključke:

1. TRIBAL algoritam je u stanju da na računarski efikasan način identifikuje prstenove u mreži, koji će povoljno uticati na gustinu matrice sistema, a samim tim i na računarsku efikasnost hidrauličkog proračuna,
2. ΔQ metoda ostvaruje gotovo identične rezultate kao i referentna GGA metoda, pokazujući neznatno bolju numeričku stabilnost,
3. ΔQ metoda je značajno računarski efikasnija od GGA metode.

U narednim fazama istraživanja potrebno je dalje unaprediti predstavljenu metodologiju tako da se: (1) omogući promena topologije mreže u toku simulacije (npr. promena statusa zatvarača) i (2) omogući simulacija u mrežama sa čvornom potrošnjom koja zavisi od pritiska u mreži.

LITERATURA

[1] Larock BE, Jeppson RW, Watters GZ. Hydraulics of Pipeline Systems. Boca Raton: CRC Press; 1999. https://doi.org/10.1201/9780367802431.

[2] Todini E. on the Convergence Properties of the Different Pipe 2006:1–16.

[3] Cross H. Analysis of flow in networks of conduits or conductors. Univ Illinois Bull Eng Exp Stn 1936.

[4] Epp R, Fowler AG. Efficient Code for Steady-State Flows in Networks. J Hydraul Div 1970;96:43–56.

[5] Todini E, Rossman L. Unified Framework for Deriving Simultaneous Equation Algorithms for Water Distribution Networks. J Hydraul Eng 2013;139:511–26. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000703.

[6] Arsene C, Bargiela A, Al-Dabass D. Modelling and Simulation of Water Systems Based on Loop Equations. Int J Simul Syst Sci Technol Spec Issue Model Simul Complex Syst 2004;5:61–72.

[7] Rossman L a. EPANET 2: users manual. Cincinnati US Environ Prot Agency Natl Risk Manag Res Lab 2000;38:200. https://doi.org/10.1177/0306312708089715.

[8] Todini E, Pilati S. A gradient method for the analysis of pipe network. Int Conf Comput Appl Water Supply Distrib 1987.

[9] Elhay S, Simpson AR, Deuerlein J, Alexander B, Schilders W. A Reformulated Co-tree Flows Method competitive with the global Gradient Algorithm for solving the water distribution system equations. J Water Resour Plan Manag 2014;140:1–10. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000431.

[10] Simpson A, Elhay S, Alexander B. Forest-Core Partitioning Algorithm for Speeding Up Analysis of Water Distribution Systems. J Water Resour Plan Manag 2014;140:435–43. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000336.

[11] Deuerlein J, Elhay S, Simpson A. Fast Graph Matrix Partitioning Algorithm for Solving the Water Distribution System Equations. J Water Resour Plan Manag 2016;142. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000561.

[12] Stanic M, Avakumovic D, Kapelan Z. Evolutionary algorithm for determining optimal tree layout of ater distribution networks. In: Babovic V, Larsen LC, editors. Hydroinformatics 98, Rotterdam: Balkema; 1998, p. 901–10.

[13] Ostfeld A, Uber JG, Salomons E, Berry JW, Hart WE, Phillips C a, et al. The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN): A Design Challenge for Engineers and Algorithms. J Water Resour Plan Manag 2008;134:556–68. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:6(556).

[14] Alvarruiz F, Vidal AM. Improving the Efficiency of the Loop Method for the Simulation of Water Distribution Systems 2015;141:1–10. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000539.

[15] Vasilic Z, Stanic M, Kapelan Z, Ivetic D, Prodanovic D. Improved loop-flow method for hydraulic analysis of water distribution systems. J Water Resour Plan Manag 2018;144. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000922.

[16] Ivetić D, Vasilić Ž, Stanić M, Prodanović D. Optimizacija mreža pod pritiskom modeliranih ΔQ metodom. Vodoprivreda 2013;264–266:265–74.

[17] Creaco E, Franchini M. The identification of loops in water distribution networks. Procedia Eng 2015;119:506–15. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.878.

[18] Jha K. Automatic minimal loop extraction and initialisation for water pipe network analysis. Int J Simul Syst Sci Technol 2007;8:8–19.

[19] Ivetic D, Vasilic Z, Stanic M, Prodanovic D. Speeding up the water distribution network design optimization using the ΔQ method. J Hydroinformatics 2016;18:33–48. https://doi.org/10.2166/hydro.2015.118.

[20] Kavitha T, Mehlhorn K, Michail D, Paluch K. A faster algorithm for minimum cycle bases of graphs. Proc ICALP 2004;3124:846–57. https://doi.org/10.1007/b99859.

[21] Creaco E, Franchini M. Comparison of Newton-Raphson Global and Loop Algorithms for Water Distribution Network Resolution. J Hydraul Eng 2014;140:313–21. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000825.

[22] Piller O. Modelling the behaviour of a network: Hydraulic analysis and sampling procedures for parameter estimation. University of Bordeaux, Bordeaux, France, 1995.

[23] Cheng SW, Dey TK, Shewchuk JR. Delaunay mesh generation. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2013.

[24] Pohl IS. Bi-directional and heuristic search in path problems. Stanford University, California, 1969.

[25] University of Exeter. Benchmarks 2018.

[26] Water Simulation. BWCN—Battle of the water calibration networks 2021. http://www.water-simulation.com/wsp/about/bwcn/ (accessed October 31, 2021).

HYDRAULIC SIMULATION IN PRESSURIZED WATER DISTRIBUTION NETWORKS USING TRIBAL-ΔQ METHOD

by

Željko VASILIĆ, Miloš STANIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

The most popular software for hydraulic analysis of pressurized water distribution networks nowadays is EPANET, globally recognized as reliable and robust. EPANET uses node-based formulation of governing equations and employs Global Gradiet Algorithm (GGA) to solve hydraulics of the network. Alternative formulation to the node-based one is the loop-flow formulation of governing equations, also known as the ΔQ method. Main advantage of the loop-flow formulation is significantly lower number of unknowns to solve for, coming from the fact that real-sized networks typically have far less loops than nodes. Main drawback is the need to identify loops in the network, a task with multiple alternative solutions and proven to be cumbersome. This paper presents new TRIBAL-ΔQ method for hydraulic simulation in pressurized water distribution networks, based on the new algorithm for identification of loops in the network (TRIBAL) and more efficient implementation of loop-flow method for hydraulic simulation (ΔQ). Main goal of presented method is to exploit obvious advantages of the loop-flow method and overcome main drawbacks identified in similar researches. TRIBAL-ΔQ method is tested on four networks varying in topology and complexity. Focus of research is on a comparison of computational efficiency of TRIBAL-ΔQ based solver with GGA based solver implemented in EPANET. Results indicate that TRIBAL-ΔQ based solver is significantly computationally faster than GGA based one, equally accurate and has slightly better numerical stability.

Key words: hydraulic symulation, ΔQ method

Redigovano 2.11.2021.