asist. Primož BANOVEC*

Sašo ŠANTL*

KALIBRACIJA IN OPTIMIZACIJA VODOVODA Z GENETSKIMI ALGORITMI

POVZETEK

V prispevku je obdelan postopek kalibracije modela vodovodnega sistema Logatec z optimizacijskim postopkom, ki sloni na uporabi genetskih algoritmov. Genetski algoritmi (GA) kot optimizacijsko orodje predstavljajo v slovenski vodarski stroki poplnoma nov pristop, v tujini pa so se aplikacije, ki slonijo na uporabi genetskih algoritmov na področju vodovodnih sistemov pričele intenzivneje razvijati po letu 1992.

Optimizacijska tehnika, ki jo imenujemo genetski algoritmi, temelji na evoluciji populacije možnih rešitev, ki se med seboj razlikujejo glede na različne vrednosti, ki jih zavzemajo odločitvene spremenljivke. Genetski algoritmi pri tem v procesu evolucije posnemajo evolucijo kot optimizacijski postopek za izbor živih bitij in slonijo tudi na primerljivih procesih, kot so: selekcija, križanje, mutacija in reprodukcija, da bi dosegli ugodne rezultate. Za proces selekcije je seveda potrebno opredeliti kriterij za selekcijo, ki ga predstavlja matematični model problema (model hidravlike vodovodnega sistema, ekonomski model vodovodnega sistema).

V primeru kalibracije modelov in optimizacije vodovodnih sistemov imamo tipično opravka s sistemi, ki imajo veliko število odločitvenih spremenljivk in velikim prostorom rešitev, ki ima zaradi narave vodovodnih sistemov veliko lokalnih optimumov.

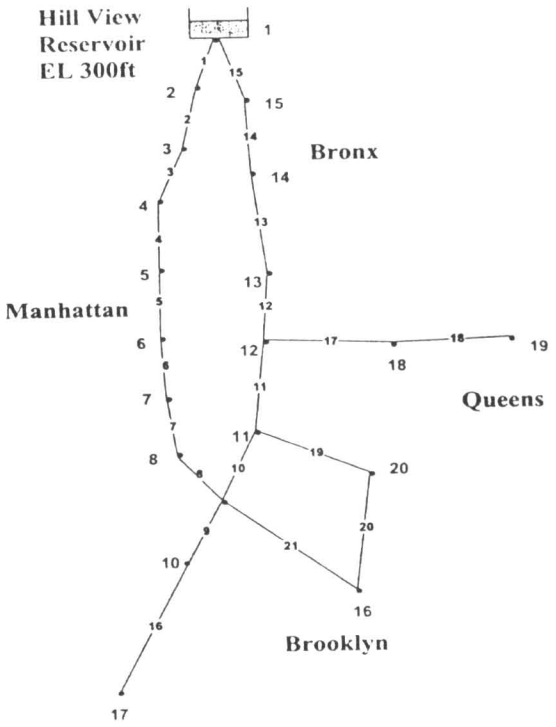
UVOD

Razvoj na področju modeliranja vodovodnih sistemov je prišel že v zrelo fazo, ko matematični modeli, ki so na razpolago, že učinkovito povezujejo modeliranje toka vode po vodovodnem sistemu in modeliranje kvalitete vode v sistemu ob različnih predpostavljenih scenarijih porabe vode. Hkrati so možne povezave z učinkovitimi GUI in GIS orodji, ki omogočajo vpogled v dogajanje v vodovodnem sistemu in povezovanje z različnimi, tudi eksternimi, prostorsko opredeljenimi bazami podatkov. Sodobni modeli kot so EPANET, STONER Synergee, WaterCAD, Cybernet, Piccolo in drugi omogočajo v večji ali manjši meri vse to. Za postopek kalibracije navedenih modelov z rezultati meritev tlakov in pretokov na samem sistemu in za nadaljno analizo variantnih rešitev vodovodnega sistema pa so inženirji do sedaj uporabljali klasično metodo poizkusa in pogreška, torej praviloma izračune subjektivno izbranih primerov, ki naj bi vodili k željenemu rezultatu. Ta metoda poizkusa in pogreška pa je zaradi obsežnosti problema kalibracije in optimizacije vodovodnih sistemov zelo počasna in nezanesljiva. Omejitev te metode nam kaže klasični primer: "New York city tunnel", ki se pojmuje kot prvi primer poizkusa optimizacije vodovodnega sistema. Leta 1968 so se v New Yorku zaradi povečane porabe in širitve mesta zavedali potrebe po posodobitvi obstoječega vodovodnega sistema (slika 1). Vsako od navedenih cevi (tunelov velikega premera – do 5,2 m) je mogoče v variantnih možnostih (možno stanje odločitvenih spremenljivk) pustiti kakršna je, opustiti ali dodati novo cev potrebnega premera.

Čeprav je sistem glavnih vodov relativno majhen (21 cevi), pa že za tako enostaven primer število možnih kombinacij ukrepov presega obvladljiv sistem za pristop poizkus-pogrešek. Za podani primer prostor rešitev za 14 možnih premerov dodatnih cevi in dveh dodatnih variant (opustitev obstoječega voda in varianta, da se na določenem odseku ne spremeni nič) obsega $1.934 \cdot 10^{25}$ možnih kombinacij, ki bi jih bilo potrebno preveriti. Običajne analize kalibracije in optimizacije vodovodnih sistemov

* Asist. Primož Banovec univ. dipl. inž. gradb., Sašo Šantl cand. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin, Jamova 2, Ljubljana

zajemajo še bistveno večji prostor rešitev in zato tradicionalni postopek poizkusi in pogreši ne pride v poštev.



Slika 1: Shema Newyorškega vodovodnega sistema (Hewitson, 2000)

Tabela 1 podaja primerjalne prednosti uporabe pristopa "poizkusi in pogreši" ter GA:

Pristop poizkusa in pogreška	GA optimizacija
časovno potratno	hitro in učinkovito
podvrženo napakam	konsistentno in natančno
subjektivno	nepristransko
identifikacija anomalij s poizkusom in napako	avtomatska identifikacija anomalij

V znanstveni literaturi je sicer mogoče najti tudi primere optimizacije vodovodnih sistemov z orodji tradicionalne matematične tehnike (npr. linearno, dinamično in nelinearno programiranje) iz obdobja 60-tih let, vendar te tehnike nikoli niso prešle v širšo praktično uporabo.

GENETSKI ALGORITMI KOT OPTIMIZACIJSKO ORODJE

Osnovna ideja uporabe orodja genetskih algoritmov (GA) kot optimizacijskega orodja je posnemanje najboljšega optimizacijskega orodja, kar jih pozna narava – evolucije in njenega osnovnega mehanizma - naravne selekcije. Iz zornega kota optimizacije procesov v naravi so vsa živa bitja, kar jih je na svetu, rezultat optimizacijskega postopka, ki je sicer neprimerno bolj kompleksen, njegove osnove pa so temelj za GA.

Z začetki razvoja računalništva se kmalu pojavila tudi ideja o razvoju optimizacijskih algoritmov, ki temeljijo na mehanizmih naravnega izbora (selekcije). Klasična dela na tem področju so Holland, 1975 in Goldberg, 1987. Šele razvoj močnejših računalnikov in učinkovitejših modelov vodovodnih sistemov je privedel do začetkov aplikacij na področju gospodarjenja z vodami na začetku devetdesetih let. Pred

obdobjem računalnikov aplikacija orodij naravne selekcije ni bila mogoča, saj so šele računalniki omogočili, da se virtualni evolucijski proces naravne selekcije pospeši do te mere, da je mogoče pridobiti rezultate uporabne za optimizacijske potrebe.

Začetki uporabe orodij GA za optimizacijo vodovodnih sistemov segajo v leto 1992. Mehanizem naravne selekcije se je izkazal kot zelo prikladen za optimizacijo vodovodnih sistemov, saj je potrebno imeti na razpolago le dobro orodje za modeliranje hidravlike vodovodnih sistemov, optimizacijski postopek z genetskimi algoritmi pa je neobčutljiv na zahteve kot so kontinuitetnost, obstoj odvoda ali linearnost, ki so pogosto pogoj pri ostalih matematičnih optimizacijskih postopkih.

OSNOVNI POSTOPEK OPTIMIZACIJE Z GENETSKIMI ALGORITMI

Da bi simulirali naravni optimizacijski proces, se za optimizacijo z GA ukvarjamo s populacijo rešitev optimizacijskega problema. Da bi to uspešno izvedli v simuliranem okolju (modelu), uporabljamo odločitvene spremenljivke, zakodirane v obliki niza binarnega zapisa, ki ga v tehniki GA poimenujemo genom. V genom lahko zakodiramo vsako odločitveno spremenljivko, pri čemer moramo biti pozorni na resolucijo, ki jo želimo pri posamezni odločitveni spremenljivki doseči. V primeru vodovodnih sistemov je ena od možnih odločitvenih spremenljivk, premer cevi, ki jih izdelujejo samo v določenih (nazivnih) premerih. Primer kodiranja take spremenljivke je prikazan v tabeli 2:

Nazivni premer cevi	dejanski notranji premer	binarna koda	celoštev-ilčna koda	hrapavost cevi ε – (mm)	cena po enoti (SIT/m')
150	151	000	1	0.2	1,200
200	199	001	2	0.2	1,800
250	252	010	3	0.2	2,300
300	305	011	4	0.2	33,000
375	384	100	5	0.2	42,000
450	464	101	6	0.2	47,000
500	516	110	7	0.2	51,000
600	615	111	8	0.2	60,000

Tabela 2: primer kodiranja odločitvene spremenljivke – premer cevi

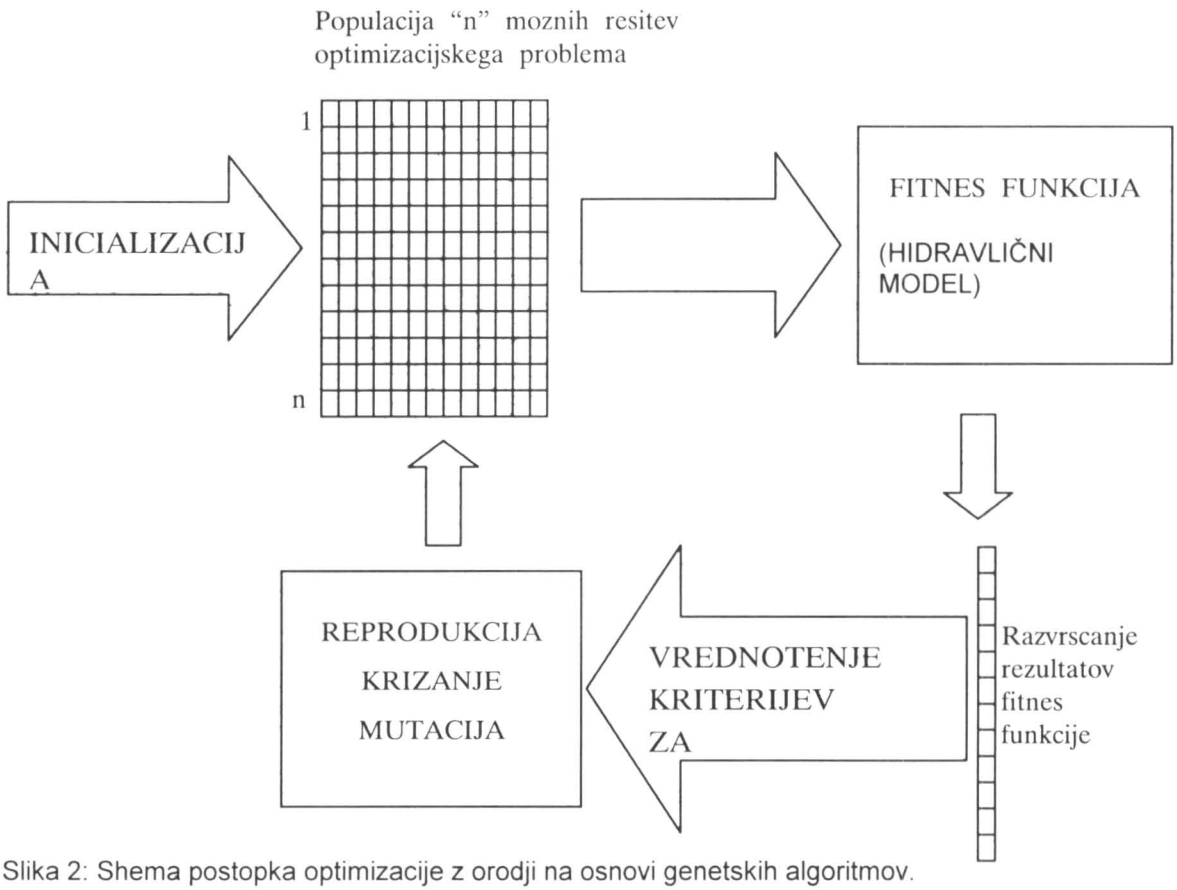
Populacija možnih rešitev optimizacijskega problema je tako sestavljena iz posameznikov, ki jih predstavljajo genomi odločitvenih spremenljivk, zakodirani v binarni obliki. Začetno vzpostavljanje populacije je naključno in ga izvedemo s sejanjem na določenem območju možnih rešitev. Za tem preide populacija v kontinuirani evolucijski proces, ki je sestavljen iz naslednjih ključnih korakov:

- določanje uspešnosti posameznika (fitnes funkcija),
- rangiranje posameznikov in opredelitev prehodnosti v naslednjo generacijo glede na uspešnost posameznika,
- križanje posameznikov,
- mutacija genskega zapisa posameznika,
- vzpostavitev naslednje populacije (glede na potrebno fiksno določeno velikost populacije).

Postopek 1 – 5 se ponavlja glede na zastavljen kriterij (npr. spremembe v rezultatu fitnes funkcije, končno število generacij). Slika 2 prikazuje osnovni postopek GA.

Predstavljeni koraki pa le okvirno opisujejo postopek, ki posnema naravne evolucijske procese. Sodobna orodja GA omogočajo tudi variantne možnosti glede načina oblikovanja populacij (steady state in različne variante povzemanja iz osnovne populacije), vzporednega dela z ločenimi populacijami z določanjem migracij med populacijami, možnega upoštevanja primero katastrof, prilagajanja populacij spremembam v okolju, konkurenčnim populacijam (princip predator-plen), načine prehoda v naslednjo generacijo (ruletno kolo), idr.

Glede na opravljene analize smo za naš optimizacijski problem privzeli obliko GA s stalno populacijo (steady state).



Slika 2: Shema postopka optimizacije z orodji na osnovi genetskih algoritmov.

Navedeni postopek smo uporabili za kalibracijo vodovodnega sistema Logatec. Problem kalibracije lahko poenostavljeno pojmujemo kot optimizacijski problem, kar je razvidno tudi v nadaljnem besedilu. Pri tem predstavlja ciljno vrednost (optimum) minimalno odstopanje vrednosti izračunanih z modelom vodovodnega sistema napram izmerjenim vrednostim na samem vodovodnem sistmeu. Neznanke oziroma odločitvene spremenljivke predstavljajo poraba vode iz vodovodnega sistema in hrapavost cevi.

KALIBRACIJA MODELA VODOVODNEGA SISTEMA LOGATEC

IZGRADNJA MODELA VODOVODNEGA SISTEMA LOGATEC

Vodovodni sistem Logatec je relativno majhen vodovodni sistem, ki oskrbuje okoli 6000 prebivalcev in industrijo, ki porabi okoli 12 l/s vode za industrijske potrebe iz vodovodnega sistema. Glede na zgodovinski razvoj sistema, se je le ta razvil v razmeroma kompleksen sistem, ki uporablja vodo iz 5 vodnih virov in je razdeljen na 3 načeloma neodvisne vodovodne sisteme. Za potrebe izgradnje modela vodovodnega sistema Logatec smo povzemali podatke iz katastrskih načrtov v merilu 1:1000, v katere je bil položaj cevi, priključkov in drugih elementov vodovodnega sistema (zasuni, hidranti, rezervoarji, črpališča, idr.) vrisan ročno.

KALIBRACIJSKI POSTOPEK

Osnova za odločanje o problemu, ki je preveč kompleksen, da bi ga obvladovali z modeli odločanja, ki jih vzpostavimo na mentalnem nivoju, so v inženirskem svetu matematični modeli. Modele naredimo na podlagi osnovih pristopov modeliranja: povzemanje is sistema, poenostavljanje podsistema, določanje paradigme modela, določanje začetnih in robnih pogojev, idr.

Tako je tudi v primeru odločanja o vodovodnih sistemih prvi korak izdelava modela vodovodnega sistema. Da pa lahko modelu in odločitvam, ki bodo izpeljane na osnovi uporabe tega modela

zaupamo, je nujno potrebno model obstoječega sistema kalibrirati glede na rezultate meritev na obstoječem sistemu.

Pri tem so osnovne odločitvene spremenljivke, vezane na kalibracijo vodovodnih sistemov, naslednje:
- poraba na vozliščih – pretoki v vodovodnem sistemu (spremenljivi zaradi različne porabe in izgub iz sistema),
- hrapavost cevi (spremenljiva zaradi staranja cevi),
- premer cevi (spremenljiv zaradi staranja cevi – obloge in usedline v cevi),
- lokalne izgube tlakov v sistemu (stanje ventilov odprto – zaprto ni vedno natančno določeno).

Glede na izkušnje (de Schaetzen, 2000) sta ključni odločitveni spremenljivki, ki ju je potrebno upoštevati v optimizacijskem postopku kalibracije, poraba na vozliščih in hrapavost cevi.

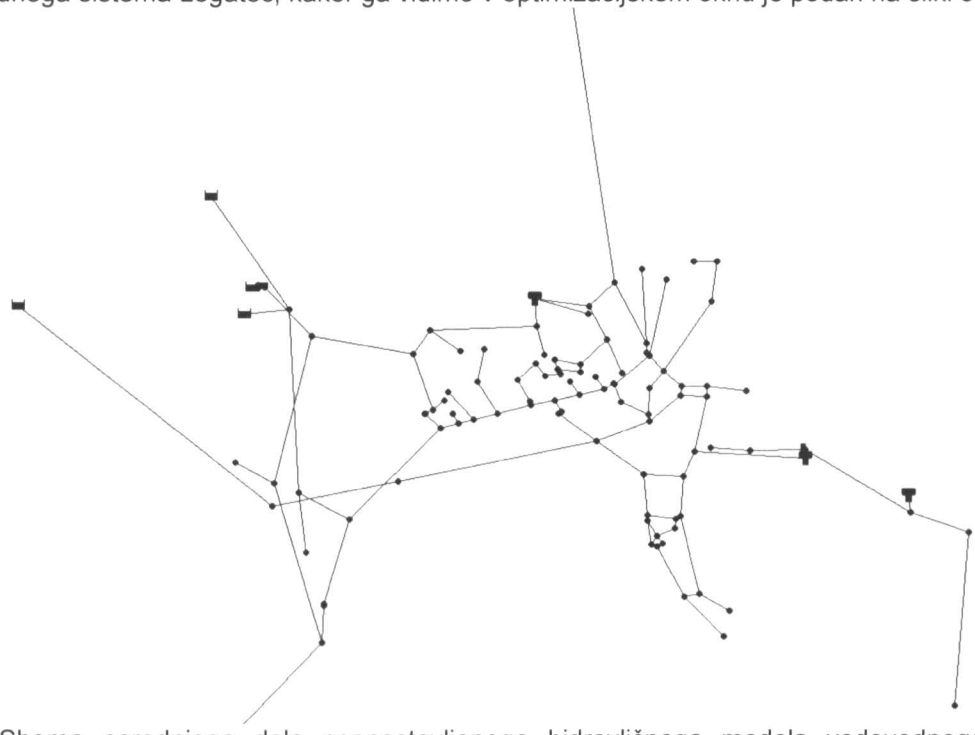
Ciljne vrednosti za kalibracijo modela vodovodnega sistema je potrebno določiti na podlagi opravljenih meritev na dejanskem vodovodnem sitemu. Ker se meritve trenutno ne izvajajo, smo za kalibracijski postopek uporabili izračunane vrednosti verificiranega sistema.

VELIKOST KALIBRACIJSKEGA PROBLEMA

Vodovodni sistem Logatec, ki ga analiziramo, je sestavljen iz okvirno 600 vozlišč in 700 cevi. Kalibracijski problemi so v primeru vodovodnih sistemov običajno zelo zahtevni, saj bi bilo potrebno upoštevati vse cevi, njihove koeficiente hrapavosti in porabo v vseh vozliščih. Poleg velikosti sistema pa na kalibracijski problem vpliva tudi velikost območja in način diskretizacije (resolucija) same odločitvene spremenljivke. V primeru kalibracije so namreč spremenljivke realna števila. Tako običajno uporabimo za analizirano območje 5-bitno resolucijo, ki nam omogoča diskretiziranje odločitvene spremenljivke na 32 mest. Enostaven račun nam pokaže, da bi imeli v primeru kalibracije celotnega vodovodnega sistema Logatec problem velikosti:

$$32^{1300} = 2^{6500} = 4.952 \cdot 10^{1956}$$

S poenostavljanjem modela vodovodnega sistema na 210 elementov (vozlišč in cevi) in omejitvijo resolucije na 50 elementov za pretoke v vozliščih in 8 elementov za opis hrapavosti cevi smo dosegli zmanjšanje polja možnih rešitev na $7.06 \cdot 10^{266}$ možnih kombinacij. Če bi imeli možnost opraviti 1 miljardo izračunov na sekundo, na 1 miljardi računalnikov hkrati, bi po metodi naključnega koraka še vedno potrebovali več časa kolikor je starost zemlje. Shematski prikaz poenostavljenega modela vovodovodnega sistema Logatec, kakor ga vidimo v optimizacijskem oknu je podan na sliki 3.



Slika 3: Shema osrednjega dela poenostavljenega hidravličnega modela vodovodnega sistema Logatec.

Kot kalibracijsko orodje je bilo potrebno uporabljati dve ločeni orodji:

programsko orodje za kalibracijski proces, ki deluje na osnovi GA
Za programsko orodje, ki omogoče optimizacijske procese na osnovi genetskih algoritmov smo izbrali knjižnico GAlib, ki so jo izdelali na Masaccusets Institute of Technology in je prosto dostopna na internet strani: http://www.geo.wvu.edu/~ytao/ga/doc/GAlib.htm.

programsko orodje s katerim je mogoče izrednotiti fitnes funkcijo modela – hidravlični model
Hidravlični model smo izdelali v programu EPANET 2.0, ki je prosto dostopen in verjetno najbolj razširjen program na svetu. Omogoča statično in psevdo-dinamično modeliranje hidravlike vodovodnih sistemov, kot tudi kvalitete vode v vodovodnih sistemih. Njegova izrazita prednost je, da je dostopna tudi njegova izvirna koda v jeziku C++, kar omogoča njegovo vgradnjo v različne druge modele – v našem primeru v GA optimizacijsko orodje. Informacije o programu EPANET 2.0 se nahajajo na internet naslovu: http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html.

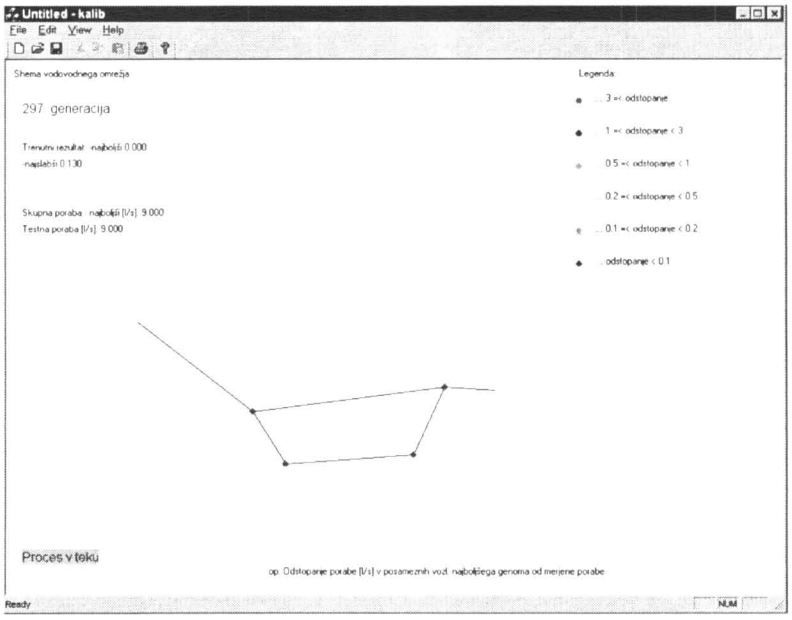
POSTOPEK IN REZULTATI KALIBRACIJE

V samem poteku kalibracije smo ugotavljali učinkovitost in preverili vpliv različnih parametrov na optimizacijski postopek. Tudi sicer se v literaturi navaja, da optimizacijski postopek z orodji GA še ni tako dognan, da bi omogočal uporabniku, ki se ne spozna na problem in medsebojne vplive parametrov optimizacijskega procesa, enostavno delo.

Osnovna značilnost rezultatov optimizacije z orodji GA je, da optimizacijski postopek najde ob vsakem novem zagonu drugačno blizu-optimalno rešitev. Vse rešitve se nahajajo blizu optimalne rešitve, vendar se znotraj območja globalnega minimuma postopek genetskih algoritmov po navedbah različnih avtorjev, zaradi narave GA, slabo približuje eksaktni optimalni vrednosti. Rešitve, ki bi odpravile to pomanjkljivost, se nakazujejo v smeri razvoja hibridnih optimizacijskih orodij.

Verifikacijo osnovnih parametrov GA in rezultatov kalibracije smo opravili na poenostavljenem posplošenem modelu, ki zaradi hitrega izračuna omogoča statistično primerjavo rezultatov. Shema modela je prikazana na sliki 4. Osnovne ugotovitve so:

- da v vseh primerih reštev optimizacijskega problema konvergira proti ciljni vrednosti,
- da se pojavlja problem poenostavljanja sistema glede na omejeno število merskih mest,
- da smo v primeru diskretiziranega področja rešitev (optimizacijski problem velikosti $6.5 \cdot 10^6$), prišli do natančne ciljne rešitev kalibracijskega problema (slika 4) v povprečju po $7 \cdot 10^4$ računih)
- da je v primeru zveznega področja rešitev (polje spremenljivk definirano s 16-bitno resolucijo – optimizacijski problem velikosti $1.6 \cdot 10^{48}$), ciljno rešitev praktično nemogoče doseči. Vendarle pa je mogoče doseči uporabno natančnost že po številu izračunov, ki so enakega velikostnega reda, kot diskretizirana rešitev. Natančneje je statistika modela z zveznim področjem rešitev podana v tabeli 3.



Slika 4: Shema poenostavljenega testnega primera v kalibracijskem oknu

	povprečna vrednost (optimizacija)	ciljna vrednost	standardna deviacija	Najboljši posameznik	enota
vozl. 1	1.0033	1.0000	0.0061	1.0083	Vozlišćna poraba (l/s)
vozl. 2	1.0872	1.0000	0.3517	1.0692	
vozl. 3	4.0057	4.0000	0.0494	3.9827	
vozl. 4	2.9750	3.0000	0.1932	2.8995	
cev 1	0.0123	0.0125	0.0003	0.0125	Hrapavost cevi (mm)
cev 2	0.0142	0.0125	0.0021	0.0131	
cev 3	0.0161	0.0125	0.0024	0.0106	
cev 4	0.0125	0.0125	0.0003	0.0125	
cev 5	0.0147	0.0125	0.0014	0.0125	
cev 6	0.0145	0.0125	0.0038	0.0113	
rezultat (kriterij optimizacijskega postopka)	0.3533	0.0		0.110	
Q skupni	9.0763	9.0		8.960	(l/s)

Tabela 3: Statistika kalibracijskih postopkov z zvezno spremenljivko (25 poizkusov z naključno generirano populacijo, 300 iteracij, 350 posameznikov v populaciji, verjetnost mutacije: 0.15).

Kalibracijo na hidravličnem modelu vodovodnega sistema Logatec smo izvajali podobno kot je prikazano na testnem primeru z izračunanimi ciljnimi vrednostmi. Zaradi obsežnosti testnih računov, ti še niso dokončni in bodo predstavljeni naknadno. S postopki vezanimi na kalibracijo vodovodnega sistma Logatec je zaključena prva faza, ki ji sledi naslednja – optimizacija posegov na vodovodnem omrežju. V prvem koraku te faze smo usmerjeni predvsem v optimizacijo premerov cevi glede na različne vzorce porabe vode v sistemu. Nadaljne faze bodo namreč vezane na hkratni razvoj stroškovnega modela vodovodnega sistema in modela tveganja, oboje v celotnem življenskem ciklu vodovodnega sistema.

ZAKLJUČKI IN NADALJNI RAZVOJ UPORABE GA NA PODROČJU VODARSTVA

Genetski algoritmi imajo z vse hitrejšim razvojem vse bolj učinkovitega modeliranja različnih procesov in hkratnim razvojem informacijskih tehnologij, še zlasti hitrosti procesorskega časa, vsekakor prihodnost na področju optimizacije procesov na področju vodarstva.

Kot optimizacijsko orodje so neodvisni od narave ali kompleksnosti samega problema, ki ga optimizirajo. Zato se njihova uporaba na področju vodarstva širi na različna področja. V prvi vrsti se to nanaša na nadaljno analizo in optimizacijo vodovodnih sistemov, kjer se uporabljajo za določanje zanesljivosti vodovodnega sistema, analizo in optimizacijo požarnih voda v vodovodnem sistemu, analizo in optimizacijo kvalitete vode v vodovodnih sistemih. Poleg uporabe na področju analize in optimizacije vodovodnih sistemov pa je njihova uporabnost na področju vodarstva še širša, saj je mogoče zaslediti primere uporabe genetskih algoritmov že na področjih hidrološkega modeliranja (Babovič, Velasquez Henao, 1998), kanalizacijskih sistemov (Blanpain, 1998) načrtovanju utrjevanja brežin (Goossens, 1998) in analizi podzemnih voda (Krom, 1998).

Naslednja razvojna faza, ki vodi na področje evolucijskih algoritmov, prinaša še učinkovitejše postopke, ki so usmerjeni v iskanje novih znanj. Pri evolucijskih algoritmih se ne spreminjajo samo odločitvene spremenljivke kot pri GA, temveč se spreminja (evolvira) sama programska koda, kar bo v prihodnosti morda omogočalo razvoj novih analitičnih orodij.

LITERATURA

Babović, V., (1998), A data mining approach to time series modelling and forecasting, Proceedings, Hydroinformatics '98, Koebenhavn, A.A. Balkema, 3-7.

Hewitson, C., Dandy G., (2000), Optimization of Water Distribution Systems Including Hydraulic and Water Quality Criteria, Water Network Modelling for Optimal Design and Management, CWS 2000,

de Schaetzen W., et. al., (2000), Sensitivity Analysis of Model Calibration to Varying Input Parameters, Water Network Modelling for Optimal Design and Management, CWS 2000,

Goldberg, D.E. (1989), Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison – Wesley Publishing Company, Inc., 412 pp.

Goldberg, D.E. (1998), 3 lessons of genetic algorithms for computational innovation, Proceedings, Hydroinformatics '98, Koebenhavn, A.A. Balkema, 3-7.

Fogel, L.J., Owens, A.J., and Walsh, M.J., (1966), Artificial intelligence through simulated evolution, Ginn Needham Height,

Halhal. D., (1998), Optimal Improvement of Water Distribution Systems, Ph.D. Thesis, University of Exeter, School of Engineering, 290 pp.

Steinman, F., Banovec, P., Kompare, B., Modelling and management hand in hand, Water Pollution 99, 24-26 May 1999, Lemnos Greece, Southampton; Boston: WIT Press, 1999, str. 141-149

Blanpain, O. et. al. (1998), Genetic algorithms to determine the profile of urban drainage networks from incomplete data, Proceedings, Hydroinformatics '98, Koebenhavn, A.A. Balkema, str. 857-864

Goossens, H., et. al. (1998) Application of a hybrid genetic algorithm for inverse model use in river design in the river Rhine, the Netherlands, Proceedings, Hydroinformatics '98, Koebenhavn, A.A. Balkema, str. 856-872.

Velasquez Henao, J.D., Hernandez Riveros, J.A., (1998), Hydrological forecasting by genetic programming, Hydroinformatics '98, Koebenhavn, A.A. Balkema, str. 873-880.

Krom T.D., Rosbjerg D., (1998), Ground water remediation strategy design in a decision analysis framework, Hydroinformatics '98, Koebenhavn, A.A. Balkema, str. 881-888.