© Strojniški vestnik 47(2001)6,263-279
ISSN 0039-2480
UDK 628.14:004.021:519.85:65.012.122
Pregledni znanstveni članek (1.02)
© Journal of Mechanical Engineering 47(2001)6,263-279
ISSN 0039-2480
UDC 628.14:004.021:519.85:65.012.122
Review scientific paper (1.02)

Načrtovanje razvoja vodovodnih sistemov z uporabo genetskih algoritmov

Genetic-Algorithms-Supported Planning of Water-Supply Systems

Franci Steinman - Primož Banovec - Sašo Šantl

V današnjem času se tudi na področju vodenja sistemov za oskrbo z vodo vse bolj uporabljajo napredna orodja. Z njimi se skuša zajeti tako uspešno poslovanje službe, ki je zadolžena za vodenje, kakor zagotoviti nemoteno oskrbo z vodo. Za dosego takih ciljev, pri katerih je treba iskati optimalno rešitev med ekonomskimi, pravnimi in tehničnimi kriteriji, smo uporabili orodje imenovano genetski algoritmi.

Nalogo smo izvedli na stvarnem manjšem, vendar kompleksnem vodovodnem sistemu. Na vzpostavljenem umerjenem hidravličnem modelu smo izvedli analizo možnih posegov, s katerimi bi zagotovili dolgoročno nemoteno oskrbo z vodo s čim manjšimi spremljajočimi stroški. Med delom smo razvili orodje, ki temelji na programski opremi EPANET in za optimizacijski del uporablja genetski algoritem. To nam je omogočilo napredno analizo trenutnih obratovalnih razmer vodovodnega sistema in iskanje optimalne rešitve med možnimi razvojnimi rešitvami.

Z nalogo smo skušali podprti procese odločanja pri vodenju vodovodnih sistemov, pri čemer je kljub omejenim finančnim osnovam treba po celotnem omrežju zagotoviti predpisane standarde glede tlakov in potreb po vodi. Taka analiza nam ponuja boljše razumevanje trenutnega obnašanja sistema, učinkovitejše vodenje, kakor tudi boljšo oceno razvojnih potreb.
© 2001 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.
(Ključne besede: sistemi vodovodni, algoritmi genetski, optimiranje sistemov, modeliranje hidravlično)

The present-day water-supply services use advanced technologies in order to provide their customers with constantly improving services. This involves the adoption of a pro-active approach to the operational management of distribution networks as a means of improving customer satisfaction. As a result, an analysis of the necessary changes in the network management and the operations, and their effects on customers, along with the reduction of operating costs and investments, was performed with an optimisation tool called genetic algorithms.

This paper presents work performed on a small, but complex, water-supply system. The work comprised building a model, model calibration, and an analysis of the development perspectives to ensure the long-term coverage of customer needs, while taking into account the limited resources available. During the work some tools were developed, based predominantly on the EPANET software, which uses genetics algorithms as an optimisation procedure. This enabled an advanced analysis of the existing performance of the water-supply system as well as an analysis of the different development options.

The objective is to support the decision-making process where, despite limited financial funds, specified pressure requirements and water demands could be met throughout the network. With the results of the analysis, a better understanding of the existing system behaviour, a more efficient management, as well as a clearer view on the development needs can be achieved.
© 2001 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.
(Keywords: water supply systems, genetic algorithms, systems optimization, hydraulic modelling)

0 UVOD

Za oskrbo z vodo in s tem povezano upravljanje z vodovodnimi sistemi je ključna uskladitev različnih interesov. Porabnik na eni strani želi zadostno količino dobre vode ob ustreznih standardih oskrbe, upravljalec želi (in mora) uspešno poslovati, občina mora po zakonu zagotoviti javno službo itn. [3]. Analize

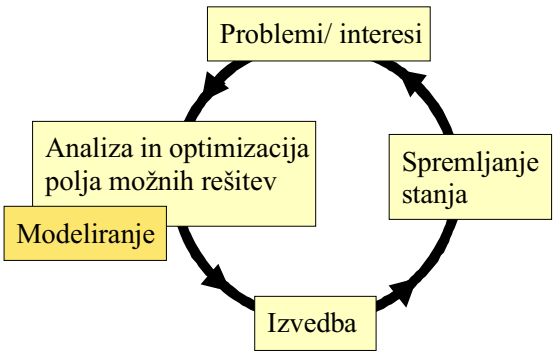
0 INTRODUCTION

Harmonisation of interests is of key importance in the area of water supply and the management of water-supply systems. On the one hand, there are customers who want a sufficient quantity of quality water along with suitable standards of supply. On the other, there are

in načrtovanje vodovodnih sistemov lahko zato z računalniškim modeliranjem in s povezovanjem različnih programskih orodij v vedno večji meri upoštevajo tako tehnično – tehnološke, kakor tudi ekonomske in pravne robne pogoje.

Vodovodni sistem je, že hidravlično gledano, zapleten sistem, ki naj bi izpolnjeval zahtevane standarde oskrbe praktično nepretrgano. Zato je pred izvedbo predlaganih posegov potrebna temeljita presoja, saj že sprememba posamičnega parametra (npr. premera cevovoda) lahko vpliva na stanje v celotnem vodovodnem sistemu (tlaki, pretoki) ali celo poslabša razmere drugje.

Slika 1 prikazuje ponavljanje v obdobju trajanja posameznega sistema. Posegi v sistem oziroma spremembe ustvarijo lahko težave pri obratovanju ali pa pojav novih interesov, ki, potem ko so usklajeni, postanejo obveznost upravljalca sistema. Za predlagane spremembe je potrebna analiza in opredelitev odločitvenega prostora in odločitvenih spremenljivk (parametri, ki jih je potrebno preveriti), nato pa iskanje optimalne rešitve. Izhodišče je verodostojen (umerjen) model obravnavanega sistema, po izvedbi del pa je potrebno spremljanje novonastalega stanja, ki pokaže morebitne obratovalne težave in pojav novih interesov (uporabnikov sistema).



Sl. 1. *Prikaz ponavljanja dogodkov v obdobju trajanja sistema*

Pomembno predstavitev optimiziranja vodnogospodarskih sistemov, kot iskanje optimalne rešitve, ki bo s čim manjšimi vlaganji dosegla čim večje koristi, opisuje [10]. Polje odločitvenih spremenljivk kmalu postane veliko, uskladitev velikega števila interesov in zahtev pa je zamudno in zahtevno delo. V svetu, in v zadnjem času tudi pri nas, se za takšne primere vse bolj uporabljajo genetski algoritmi (GA), ti slonijo na posnemanju evolucijskih postopkov, ki se odvijajo v naravi.

Za obravnavo vodovodnih sistemov oz. presojo predlaganih posegov vanje smo izdelali programski okvir GA-net, v katerem so povezane različne programske opreme. Za dve ključni programski opremi: EPANET in GA podajamo opis, potreben za razumevanje postopka, nato pa prikaz uporabe GA-net na primeru vodovodnega sistema Logatec.

managers who wish to (and have to) run a successful business, municipalities, which according to the law, have to provide a suitable public service, etc. [3].

From the hydraulic point of view, a water-supply system represents a complex system that should meet the required standards of supply practically continuously. That is why a thorough estimation is necessary prior to the implementation of certain works, since a modification of a single parameter, e.g. the diameter of a pipe, can have an impact on the situation in the entire system (pressures, flows) or may even aggravate the conditions in some other parts of the system.

Fig. 1 presents the life cycle of a certain system. Prior to the realisation of works, an analysis and optimisation of determined decision variables have to be made. The starting point is a calibrated model of the system. When the process of construction is finished, new conditions must be monitored to find any new possible problems and interests.

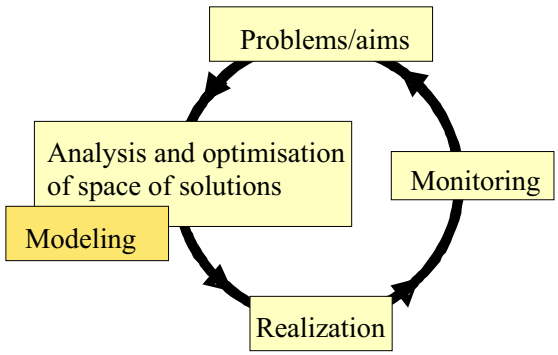


Fig. 1. *Life cycle of the system*

A lot of work has already been done in the area of optimising water engineering [10], but the number of decision variables can be enormous, therefore, the harmonisation of aims and requests can become a long-lasting process. In the world, and recently also in Slovenia, attempts have been made to solve such problems with the application of Genetic Algorithms (GA), the basic idea of which is to imitate natural evolution processes.

A tool called GA-net was developed for the analysis of a water-supply system, this tool combines genetic algorithms and software for hydraulics simulations. The applicability and a review of some of the results are presented for an example of a water-supply system in the town of Logatec, which is a typical Slovenian town.

1 HIDRAVLIČNO MODELIRANJE

Uporabili smo programsko opremo EPANET 2.0, ki jo je razvila ameriška organizacija za varstvo okolja US EPA (US Environmental Protection Agency). Orodje je brezplačno dostopno, omogoča simuliranje stalnih in nestalnih hidravličnih razmer in kakovosti vode v vodovodnih sistemih [13] in je eno najbolj razširjenih orodij na tem področju.

Poudariti je treba, da je EPANET zasnovan na načelu zahtev, kar pomeni, da se hidravlične razmere v sistemu spreminjajo glede na trenutne odvzeme uporabnikov vode v posameznih vozliščih in se glede na porabe v vozliščih izračunajo s tem povezani tlaki in pretoki po celotnem sistemu. Zato je mogoče izračunati hidravlične razmere v vodovodnem sistemu tudi v primeru, ko so odvzemi vode večji od hidravlične prevodnosti sistema, le da tedaj izračun pokaže pojav negativnih (relativnih) tlakov v sistemu. Le ti so sicer v sistemu možni, zahtevajo posebne ukrepe pred pojavom kavitacije, povzročijo pa, da na odseku s podtlakom seveda ni mogoč običajen odvzem vode.

1.1 Matematična izhodišča

Metodo, ki je uporabljena v EPANET za reševanje enačb za opis hidravličnih razmer v vodovodnem sistemu na določenem mestu (vozlišču) in ob določenem času, lahko poimenujemo »hibridni postopek vozliščne zanke«. V [5], kasneje v [4] pa so jo poimenovali »gradientna metoda«. Podobne postopke sta opisala tudi Haman in Brameller [2] kot »hibridno metodo« ter Osiadacz [9] z imenom »Newtonova metoda vozliščnih zank«. Edina razlika med opisanimi metodami je v načinu, kako se pretoki v ceveh določajo po vsaki iteraciji. V EPANET je uporabljen preprostejši Todinijev postopek, katerega matematična razlaga je podana v nadaljevanju.

Predpostavimo, da imamo vodovodni sistem z N stičnimi vozlišči in NF višinsko določenih vozlišč (npr. vodohrani in zbiralniki). Naj bo odnos pretok – energijske izgube v cevovodu med i-tim in j-tim vozliščem podan z izrazom:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (1),$$

kjer so: H - celotna energija vozlišča, h - energijske izgube, r - koeficient upora (trenja), Q - pretok, n - eksponent toka in m - skupni koeficient lokalnih izgub v cevovodu med i-tim in j-tim vozliščem.

Izgube v črpalkah so zapisane s potenčno enačbo v obliki:

1 HYDRAULIC MODELLING

For the realisation and description of the hydraulic modelling, the EPANET computer program was used. EPANET 2.0 is a computer program, developed by US EPA (US Environmental Protection Agency), that performs an extended-period simulation of hydraulic and water-quality behaviour within pressurised pipe networks [13].

It is important to emphasise that the mathematical model used was designed on the »demand-driven« principle, which indicates that the hydraulic conditions of the water system (pressure, flows) are a result of water demand in the system, according to which pressures and flows are calculated for the whole system. Therefore, it is possible to calculate the hydraulic conditions in the water-supply system, even in cases when the water demands are higher than the hydraulic capabilities of the system. However, in such cases the calculation may indicate the appearance of negative pressures in the system.

1.1 Hydraulics

The method used in EPANET to solve the flow continuity and headloss equations that characterise the hydraulic state of the pipe network at a given point in time can be termed a hybrid node-loop approach. Todini and Pilati [5] and later Salgado et al., [4] chose to call it the "Gradient Method". Similar approaches were described by Hamam and Brameller, [2] (the "Hybrid Method) and by Osiadacz, [9] (the "Newton Loop-Node Method"). The only difference between these methods is the way in which the link flows are updated after a new trial solution for nodal heads has been found. Because Todini's approach is simpler, it was chosen for use in EPANET.

Assume we have a pipe network with N junction nodes and NF fixed-grade nodes (tanks and reservoirs). Let the flow-headloss relation in a pipe between nodes i and j be given as:

where H = nodal head, h = headloss, r = resistance coefficient, Q = flow rate, n = flow exponent, and m = minor-loss coefficient. The value of the resistance coefficient will depend on which friction headloss formula is being used (see below).

For pumps, the headloss (negative of the head gain) can be represented by a power law of the form:

$$h_{ij} = \omega^2 (h_0 - r(Q_{ij} / \omega)^n) \quad (2),$$

kjer so: h_0 - tlak kadar ni pretoka, ω - nastavitev relativne hitrosti ter *r* in *n* - koeficienta črpalne krivulje. Druga skupina enačb, ki morajo biti izpolnjene, so enačbe izravnave pretokov v posameznih vozliščih:

where h_0 is the shutoff head for the pump, ω is a relative speed setting, and r and n are the pump curve coefficients. The second set of equations that must be satisfied is the flow continuity around all nodes:

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \quad \begin{matrix}\text{za } i = 1, \ldots, \text{N} \\ \text{for } i = 1, \ldots, \text{N}\end{matrix} \tag{3}$$

kjer so: *Qij* - vsi pretoki v cevovodih, ki se stikajo v vozliščih, in D_i - zahtevan iztok oz. odvzem v vozlišču *i* (vtok v vozlišče je po dogovoru pozitiven). Z znanimi celotnimi energijami v višinsko določenih vozliščih (npr. gladina v rezervoarju) je treba določiti še vse druge celotne energije H_i in pretoke Q_{ij}, pri katerih bosta izpolnjeni enačbi (2) in (3).

where D_i is the flow demand at node i and by convention, flow into a node is positive. For a set of known heads at the fixed-grade nodes, we seek a solution for all heads *Hi* and flows Q_{ij} that satisfy Eqs. (1) and (3).

Pri uporabljenem »gradientnem pristopu« se izračun začne s približno oceno pretokov v vsakem cevovodu, pri čemer ni treba zadostiti enačbi izravnanih pretokov v vozliščih. Nove skupne energije za vsako vozlišče se ob vsaki iteraciji določijo z rešitvijo matrike:

The gradient-solution method begins with an initial estimate of flows in each pipe that may not necessarily satisfy flow continuity. At each iteration of the method, new nodal heads are found by solving the matrix equation:

$$\text{AH} = \text{F} \tag{4}$$

kjer so A = NxN Jacobijeva matrika, H = Nx1 vektor neznanih skupnih energij v vozliščih ter F = Nx1 vektor robnih pogojev.

where A = an (NxN) Jacobian matrix, H = an (Nx1) vector of unknown nodal heads, and F = an (Nx1) vector of right-hand-side terms.

Diagonalni členi v Jacobijevi matriki so podani:

The diagonal elements of the Jacobian matrix are:

$$A_{ii} = \sum_j p_{ij} \tag{5}$$

medtem ko so od nič različni zunajdiagonalni členi enaki:

while the non-zero, off-diagonal terms are:

$$A_{ij} = -p_{ij} \tag{6}$$

kjer je p_{ij} - inverzna vrednost energijskih izgub v cevi med *i*-tim in *j*-tim vozliščem, ki so izračunane za dani pretok. Za cevi je:

where p_{ij} is the inverse derivative of the headloss in the link between nodes i and j with respect to flow. For pipes:

$$p_{ij} = \frac{1}{nr\left|Q_{ij}\right|^{n-1} + 2m\left|Q_{ij}\right|} \tag{7}$$

za črpalke pa:

while for pumps:

$$p_{ij} = \frac{1}{n\omega^2 r(Q_{ij}/\omega)^{\text{n-1}}} \tag{8}$$

Vsak element vektorja robnih pogojev je seštevek neuravnoteženosti bilance pretoka v vozlišču in iz tega izhajajočih popravkov:

Each right-hand-side term consists of the net flow imbalance at a node plus a flow correction factor:

$$F_i = \left(\sum_j Q_{ij} - D_i\right) + \sum_j y_{ij} + \sum_j p_{if} H_f \tag{9}$$

kjer zadnji člen povezuje *i*-to vozlišče z višinsko določenim vozliščem. Popravek, ki ga vpeljemo v enačbah za cevovode, je:

where the last term applies to any links connecting node i to a fixed-grade node f and the flow correction factor y_{ij} is:

$$y_{ij} = p_{ij}\left(r\left|Q_{ij}\right|^n + m\left|Q_{ij}\right|^2\right)\text{sgn}(Q_{ij}); \quad \begin{cases} Q_{ij} > 0 \rightarrow \quad \text{sgn}(Q_{ij}) = 1 \\ Q_{ij} < 0 \rightarrow \text{sgn}(Q_{ij}) = -1 \end{cases} \tag{10}$$

za črpalke pa:

$$y_{ij} = -p_{ij}\omega^2 (h_0 - r(Q_{ij}/\omega)^n) \quad (11),$$

pri čemer je pretok Q_{ij} vedno pozitiven.

Ko so izračunane nove vrednosti skupnih energij v vozliščih po enačbi (5), se določi nova iteracijska vrednost pretokov v posameznih cevovodih:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - \left(y_{ij} - p_{ij}\left(H_i - H_j\right)\right) \quad (12).$$

Če je relativna razlika med vsoto absolutnih sprememb pretokov in vsoto vseh pretokov v vseh cevovodih večja od sprejemljive (npr. 0,001), zapisana v obliki:

$$\frac{\sum |Q_{ij,n+1} - Q_{ij,n}|}{\sum Q_{ij,n+1}} \geq 0,001 \quad (13),$$

sledi ponoven izračun z enačbami (3) in (4). Po določitvi novih pretokov po enačbi (13) je praviloma že pri prvi iteraciji izpolnjen pogoj izravnave pretokov v vseh vozliščih.

2 GENETSKI ALGORITMI

Genetski algoritmi (GA) posnemajo proces evolucije kot optimizacijski proces iz narave in njen osnovni mehanizem, naravno selekcijo. Posnemanje naravnega optimizacijskega postopka se z GA izvede s populacijo možnih rešitev optimizacijskega problema, zato za izdelavo simuliranega okolja (modela) uporabljamo odločitvene spremenljivke, ki so zapisane v obliki niza, ki ga v tehniki GA poimenujemo ***genom*** [6].

V vodovodnem sistemu (sl. 2) je elementov sistema in njihovih lastnosti veliko (premeri cevovodov, moč črpalke itn.), za analizo pa opredelimo kot odločitvene spremenljivke (tiste, o katerih teče proces odločanja) le tiste, ki se lahko spreminjajo. V obliki genoma zapišemo vsako odločitveno spremenljivko, za katero iščemo optimalno rešitev (sl.2). Tako je ena od možnih odločitvenih spremenljivk premer cevovoda, za katerega je polje mogočih rešitev (premerov) določeno s tehnologijo izdelave cevi, ki se praviloma izdelujejo samo v določenih standardiziranih premerih. Genom je lahko zapisan v celoštevilski ali binarni obliki, pri čemer mora imeti koda enoličen pomen. Pomembno je, da je v genomu vsak gen enolično določen, da torej vemo, kateri gen pomeni določeno odločitveno spremenljivko (npr. na sl. 2 je prvi gen v genomu rezerviran za informacijo o koti dna vodohrana).

Drugi pomembni del pri zasnovi GA je določitev in opredelitev funkcije vrednotenja (fitnes funkcije) odločitvene spremenljivke. Ta funkcija je namenjena za selekcijo v trenutni populaciji možnih rešitev in za razvrščanje posamezne rešitve (genomov) po uspešnosti izpolnjevanja zastavljenih kriterijev.

Za boljšo ponazoritev in razumevanje GA kot optimizacijskega orodja je na sliki 3 prikazan primer preprostega optimizacijskega postopka na vodovodnem sistemu. Predmet analize za odločanje je šest (označenih) cevovodov, ki imajo lahko različne premere, in vodohran, pri

while for pumps:

Q_{ij} is always positive for pumps.

After new heads are computed by solving Eq. (4), new flows are found from:

If the sum of absolute flow changes relative to the total flow in all links is larger than some tolerance (e.g., 0.001):

then Eqs. (4) and (12) are solved once again. The flow update formula (12) always results in a flow continuity around each node after the first iteration.

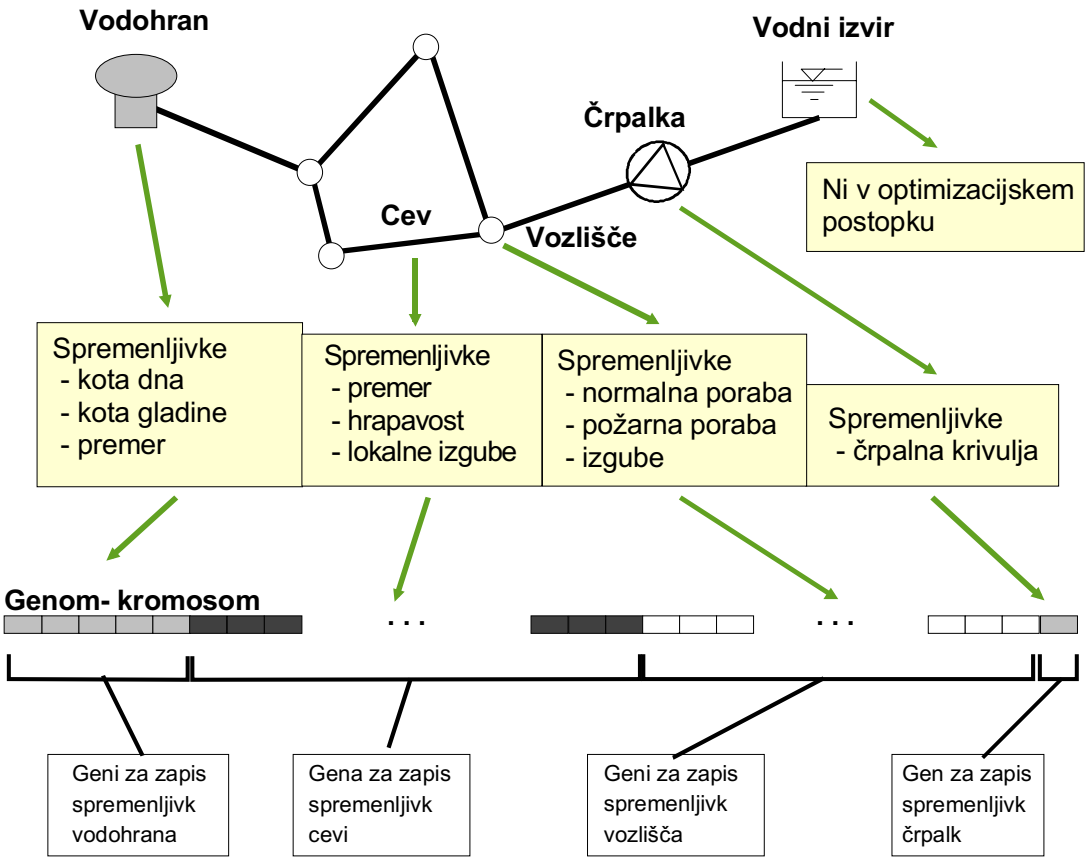
2 GENETIC ALGORITHMS

The basic idea of the optimisation with the GA tool is the imitation of processes taken from nature – evolution and its basic mechanism, natural selection. From the aspect of nature, all living things are an outcome of a large and complex historical optimisation.

Genomes (chromosomes) are made from units called genes, i.e. decision variables arranged in a linear succession where every gene controls the inheritance of one or several characteristics (Fig.2). In the case of water-supply systems, the decision variables can be the diameters of the pipes, the range of which can vary in accordance with supplier-fixed diameters. The genomes can be represented in a number of ways. The simplest approach uses binary encoding where each chromosome consists of a string of binary digits (sequences of ones and zeros). It is important to know which gene carries information about a certain decision variable. For example, the first gene in Fig. 2 controls the inheritance of the value for a tank's elevation.

The second part of the definition of the GA is a determination of the fitness function where fitness value is determined on the basis of objective function. The fitness function is used to assign a »score« to each genome, measuring the extent to which that genome provides a solution to the problem.

For a better understanding of the GA as an optimisation tool, Fig. 3 presents a case with a simple water-supply system. Decision variables are the diameters of the pipes and the characteristics of the tank (diameter and elevation). In this case the



Sl. 2. *Prikaz možnega načina zapisa odločitvenih spremenljivk v genom*

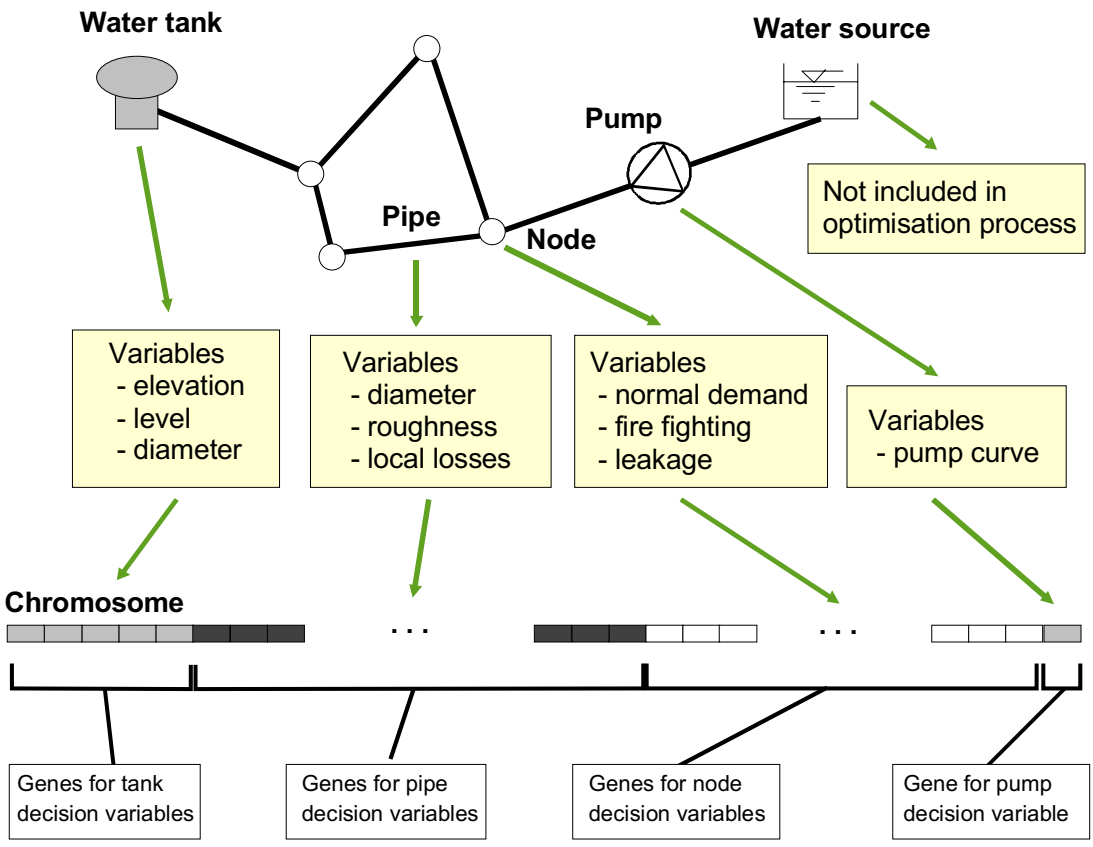


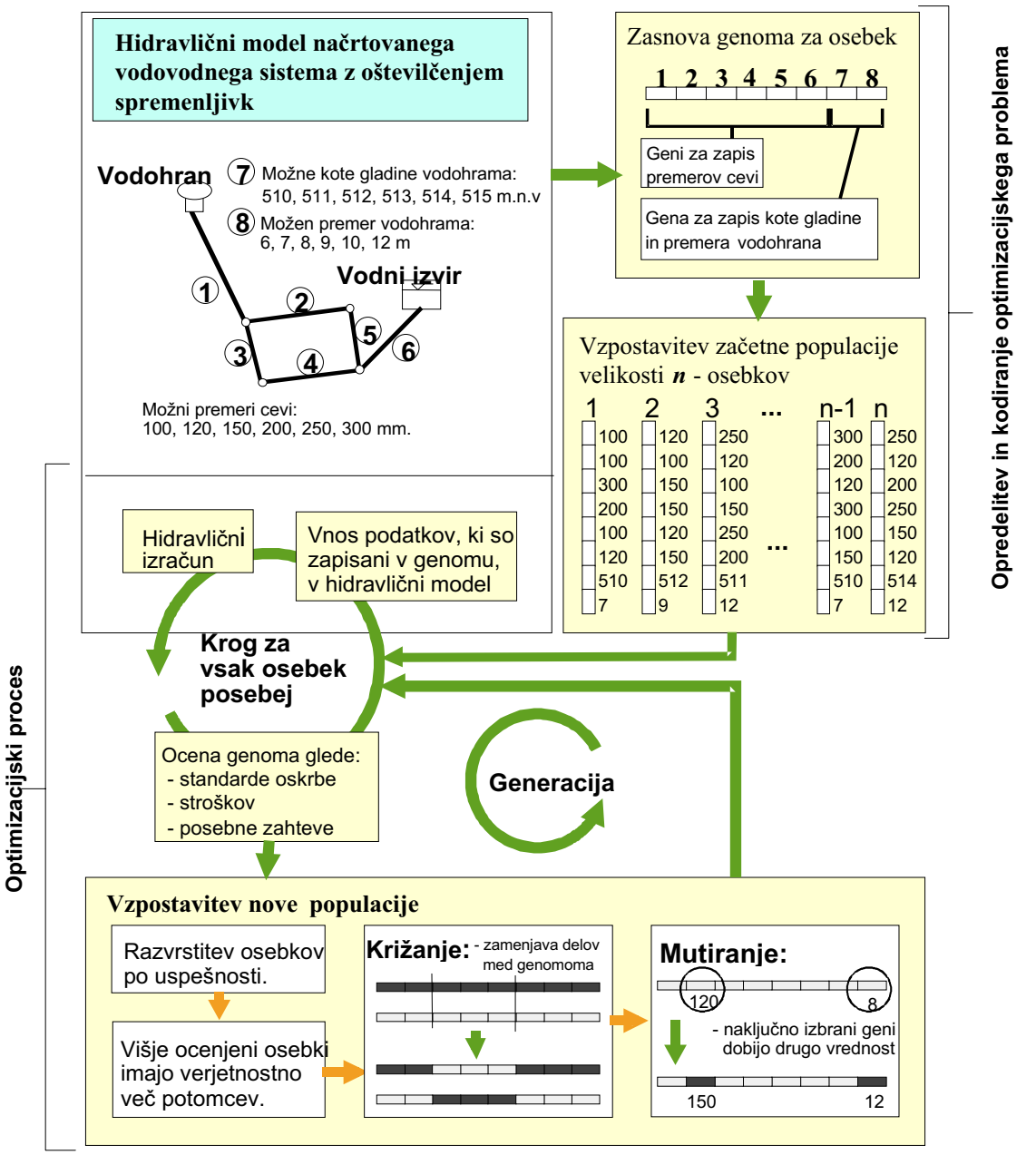
Fig. 2 *Encoding of decision variables*

katerem iščemo najprimernejšo koto gladine vode v okroglem vodohranu in njegov premer (in s tem prostornino) vodohrana. Najprej določimo obliko genoma, v katerega bodo zajete navedene odločitvene spremenljivke. Sledi vzpostavljanje začetne populacije osebkov (vsak pomeni eno varianto) z naključnim zapisom (sejanjem) na območju zgoraj navedenih mogočih rešitev.

Proces optimiziranja se začne z ovrednotenjem posameznega osebka. Najprej informacijo genske kode osebka vnesemo v hidravlični model načrtovanega sistema. Vsak posamezen osebek se ovrednoti glede na to, kako uspešno zagotavlja standarde oskrbe (primernejši tlaki in hitrosti vode so bolje ocenjeni), kakšne stroške povzroča (večji premer cevovoda ali dimenzije vodohrana pomenijo večje stroške, zato slabša ocena), mogoče pa je ocenjevanje tudi glede na kakšne druge zahteve (ekologija, druge omejitve ali interesi ipd.).

variables are encoded in integer-number genomes. After that, random initialisation of the population is established in the pre-defined range of possible solutions.

After the initialisation, the optimisation starts with an evaluation of each genome of the population. Decision variables are exported to the hydraulic model to calculate the hydraulics behaviour of the system. Each genome is evaluated with regard to supply requirements (inappropriate pressures are penalised), costs (higher costs are also penalised), and some particular requirements (ecology, other plans and interests, etc.).



Sl. 3. *Prikaz procesa optimiziranja na primeru vodovodnega sistema*

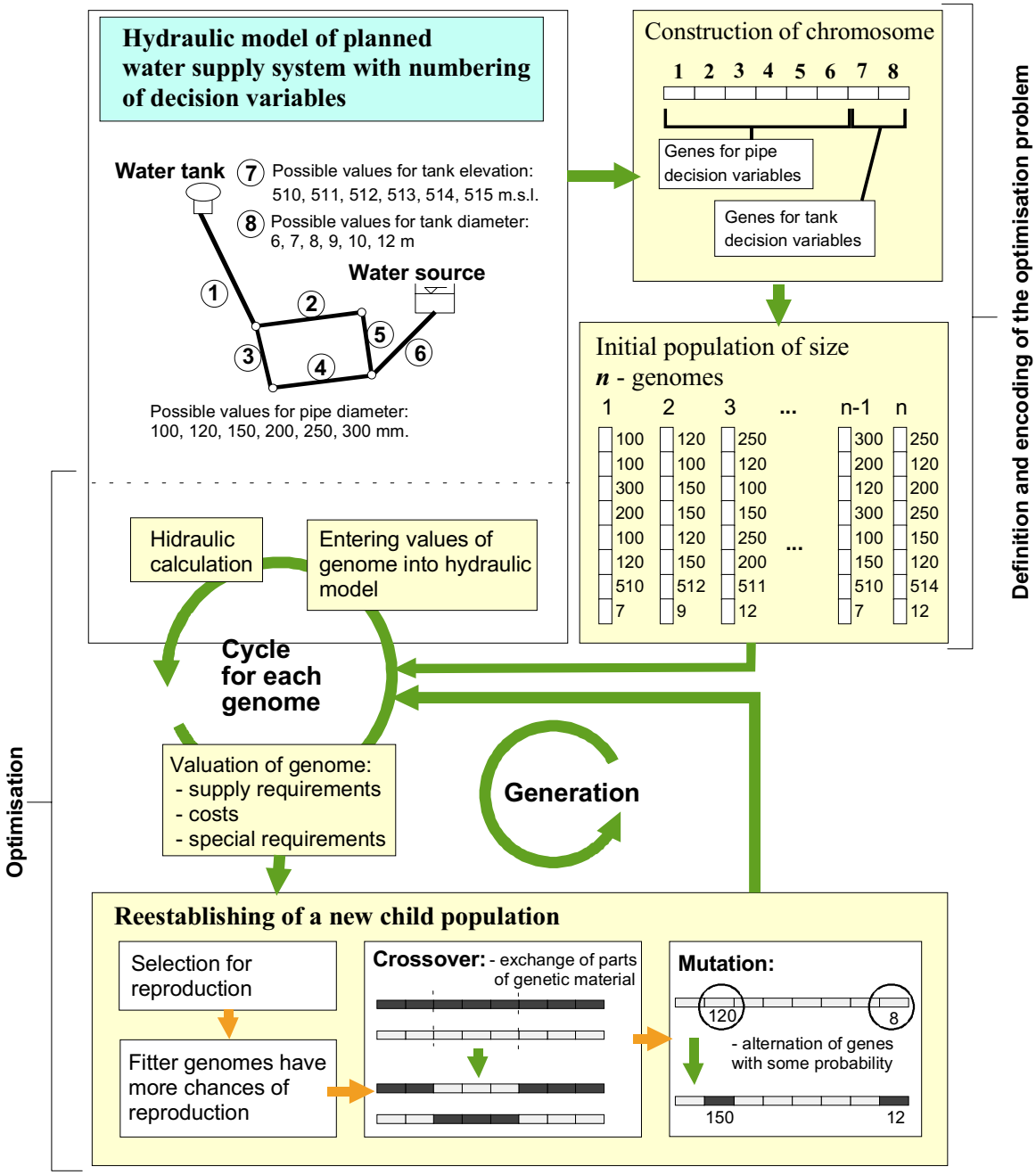


Fig. 3. *An example of an optimisation process applying GA*

Po ovrednotenju se vsi osebki populacije razvrstijo glede na dosežene ocene. Najslabše ocenjeni posamezniki se izločijo, za preostale pa se izvedeta postopka, ki jih poznamo iz narave živih bitij:

- **razmnoževanje s križanjem:** Pri tem je pomembno spomniti, da imajo višje ocenjeni osebki več potomcev, saj v procesu žrebanja (t.i. ruletno kolo) po verjetnostni teoriji večkrat pridejo na vrsto pri razmnoževanju. Razmnoževanje se izvaja tako dolgo, dokler izločenih osebkov ne nadomestijo novi.Tako je na voljo nova populacija (oz. generacija), ki je enako velika kakor začetna.
- **mutiranje:** V populacijo se poseže neposredno, tako da naključno izbranemu genu spremenimo neko vrednost. Na ta način ustvarimo stanje, da

After the evaluation of the entire population is finished, the genomes are ranged with regard to the total score. The worst genomes are eliminated and the others are put into the process for the creation of a new (child) generation:

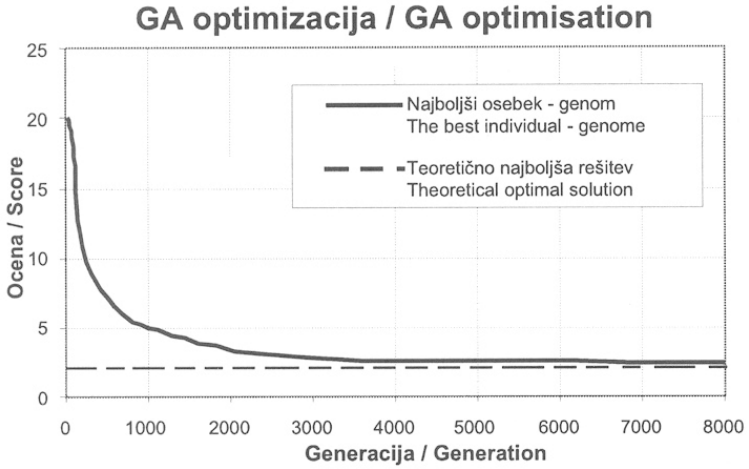
- **crossover**. The function of crossover is to ensure that the child chromosomes differ from their parents. Once two parent genomes have been selected (better evaluated chromosomes have more possibilities for multiplication) crossover involves the exchange of parts of their genetic material to form two new child genomes,
- **mutation**. Mutation is the final operator in the genetic process and it operates on single

lahko vplivajo na proces tudi naključni pojavi, ki jih sicer ne bi pričakovali (npr. vpliv višje sile).

Celoten postopek (nove populacije, hidravlični izračuni, ocenjevanje itn.) izvajamo tako dolgo, dokler ni več opaziti sprememb oziroma izboljšanja ocen zaporednih populacij. Kakor lahko vidimo na sliki 4, se proces izboljšanja ocene počasi ustali in se z nadaljevanjem postopka ne spreminja več. Tedaj so izračunane razmere (vrednosti odločitvenih spremenljivk) optimalne pri postavljenih robnih pogojih in po podanih kriterijih ocenjevanja.

chromosomes where each gene is altered with a small probability. If the probability of mutation is too high, the GA degenerates into a random search process (Schaetzen, 2000).

The whole process of optimisation is repeated until there are no more changes to the best score. Fig. 4 shows how the best score slowly converges through generations, leading to the optimum solution, considering the stated terms and fitness function.



Sl. 4. *Potek GA optimizacije kaže ustalitev ocene najboljšega osebka (najboljše možne rešitve)*
Fig. 4. *An example of GA optimisation with the presentation of the score of the best genome in each generation*

3 PRIMER – VODOVODNI SISTEM LOGATEC

Prikazali bomo lahko le nekaj rezultatov praktične uporabe na vodovodnem sistemu Logatec. Sistem oskrbuje s pitno vodo okoli 7000 prebivalcev ter nekaj večjih industrijskih uporabnikov. Spada med stare vodovodne sisteme, saj so deli sistema stari tudi 80 in več let. Vodovodni sistem zajema vodo iz več zajetij, ki gravitacijsko napajajo sistem, in iz dveh vodnjakov s črpališči. Različni vodni viri in postopna gradnja so oblikovali sistem tako, da ga, glede na tlake v sistemu, lahko razdelimo na tri dele: visokotlačni, srednjetlačni in nizkotlačni del. Med tlačnimi deli sistema je mogoč pretok vode le prek različnih regulacijskih elementov (npr. redukcijski tlačni ventil).

Vodovodni sistem Logatec v trenutnem stanju deluje na meji svojih zmogljivosti, v času največjih porab vode v sušnem obdobju pa že prihaja do motene oskrbe z vodo (prenizki tlaki). Da bi zagotovili nemoteno oskrbo, so bili največji posegi načrtovani na območju današnjega nizkotlačnega dela sistema (sl. 5). Predvideno je novo črpališče v Cuntovi grapi (dve črpalki CG-4 in CG-5), protileżni vodohran Sekirica in primerne cevovodne povezave. Pravni robni pogoji zahtevajo, da morajo biti doseženi predpisani standardi oskrbe, ekonomski robni pogoji pa narekujejo čim manjše spremljajoče stroške investicije oz. stroškov vzdrževanja in obratovanja.

3 CASE STUDY – THE WATER-SUPPLY SYSTEM OF LOGATEC

In order to demonstrate the genetic algorithm optimisation approach, the water-supply system of the town of Logatec was discussed. The system supplies around 7000 residents and a few industrial consumers. It can be placed among old systems, since some parts are older than 80 years. Due to different water sources (springs, wells) and stage development, the system is divided into three zones: high-pressure, middle-pressure and low-pressure parts. Through control devices (pressure reducing valves, pressure sustaining valves, etc.), the water can also be distributed from higher to lower zones.

Today, the water-supply system of Logatec operates at its limits. During a deficiency of water in a time of peak consumption, the requirements of the supply are continuously disturbed (low pressures). To ensure an undisturbed water supply, the interventions are planned on the lower-pressure part (Fig. 5). The plan includes well-pump station (two wells CG-4 and CG-5) with storage facility (Sekirica tank) and suitable pipeline connections. Planning must take into account the pressure requirements and the water demands as well efficient management.

3.1 Prikaz uporabljenega postopka

Posegi v vodovodni sistem Logatec so bili predlagani v različnih projektih, zato so v prikazani analizi vključene naslednje odločitvene spremenljivke:

- spremembe premerov cevovodov: možni premeri cevi so (točke genoma 1 do 10) v mm: 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, oz. cev ni potrebna;
- spremembe moči črpalk: črpalna krivulja po projektu je množena z različnimi faktorji (točki genoma 11 in 12): 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2, 1,3;
- najprimernejša nadmorska višina vodohrana: možne kote dna vodohrana so (točka genoma 13) [m.n.v.] : od 520 do 550 (s korakom 1m);
- dodano je lokalno zvišanje energije (izražene kot tlak) na območju Tabora z vgradnjo črpalke, ki naj lokalno dvigne tlak (točka genoma 14) v bar: od 0,1 do 3 bar (s korakom 0,1 bar), in dodatna možnost – črpalke ni treba dodati.

Za črpalki v vodnjakih CG-4 in CG-5 sta prav tako upoštevani črpalni krivulji (višina črpanja s pripadajočim pretokom), predvideni po projektih (Hidroinženiring, 1998), in dodane variacije črpalnih krivulj, zajete s pomočjo faktorjev. Tako faktor 1,0 pomeni, da je upoštevana s projektom načrtovana črpalna krivulja, faktorji manjši od 1,0, zmanjšujejo njene vrednosti, faktorji, višji od 1,0, pa jo zvišujejo [13], kar je upoštevano v točkah genoma 11 in 12. Po opravljenih izračunih je seveda mogoče (iteracijsko) upoštevati dejanske (proizvajalčeve) črpalne krivulje črpalk, ki zadoščajo novim obratovalnim razmeram.

Če upoštevamo naštete predloge posegov v sistem, je število vseh možnih kombinacij (variant), ki opredeljujejo velikost optimizacijskega prostora mogočih rešitev, ki jih z navedenimi spremenljivkami ustvarimo, ogromno, saj znaša:

3.1 Presentation of the used approach

In accordance with the suggested interventions from different projects, further decision variables and their possible values (with widening of the range) have been defined (Fig. 5):

- pipe diameters (position in genome - 1 do 10): possible values [mm]: 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, or pipe is not necessary;
- pumps (position in genome - 11 in 12): pump curve with different speed factors: 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3;
- elevation of the tank (position in genome - 13): possible values [meters above sea level]: from 520 to 550 (1m step);
- local buster pump in the area of Tabor (position in genome 14) [bar] : from 0.1 to 3 bar (0.1 bar step), or buster is not necessary.

Possible values of pipe diameters result from a technical estimation of the required diameters with additional expanding (diameter 400 and 450 mm). A storage tank is planned on the nearby hill, which is 550 m above sea level. The range of possible pumps was estimated on the basis of previous research (Hidroinženiring Ltd., 1998). A pump curve represents the relationship between head and flow rate that a pump can deliver at its nominal speed setting. The pump curve shifts as the speed changes, so factor 1.0 defines the planned pump, factors lower than 1.0 lower the pump curve, and factors higher than 1.0 increase it (Rossman, 2000).

Considering the mentioned decision variables, the number of all possible solutions (combinations) is:

$$n = 5,05 \times 10^{13} \quad (14).$$

Posebni del, ki ga je treba skrbno določiti, je funkcija vrednotenja posameznega osebka - genoma. Uporabili smo večkriterijsko vrednotenje, pri katerem je treba opredeliti tudi pomembnost posameznih kriterijev (sl. 6). Ker so npr. standardi oskrbe glede zahtevanih tlakov predpisani, smo jih opredelili kot primarni kriterij, saj je veljavne predpise treba spoštovati, tudi če imajo morda (npr. finančno) neugodne posledice. V primeru višje sile (npr. izpad cevovoda) ali predpisanih vrednosti ob požaru pa je začasno lahko znižan standard oskrbe (kakor bi sicer veljal za normalno obratovanje), zato so upoštevane tri različne funkcije ocenjevanja tlakov (za 3 obtežbene primere).

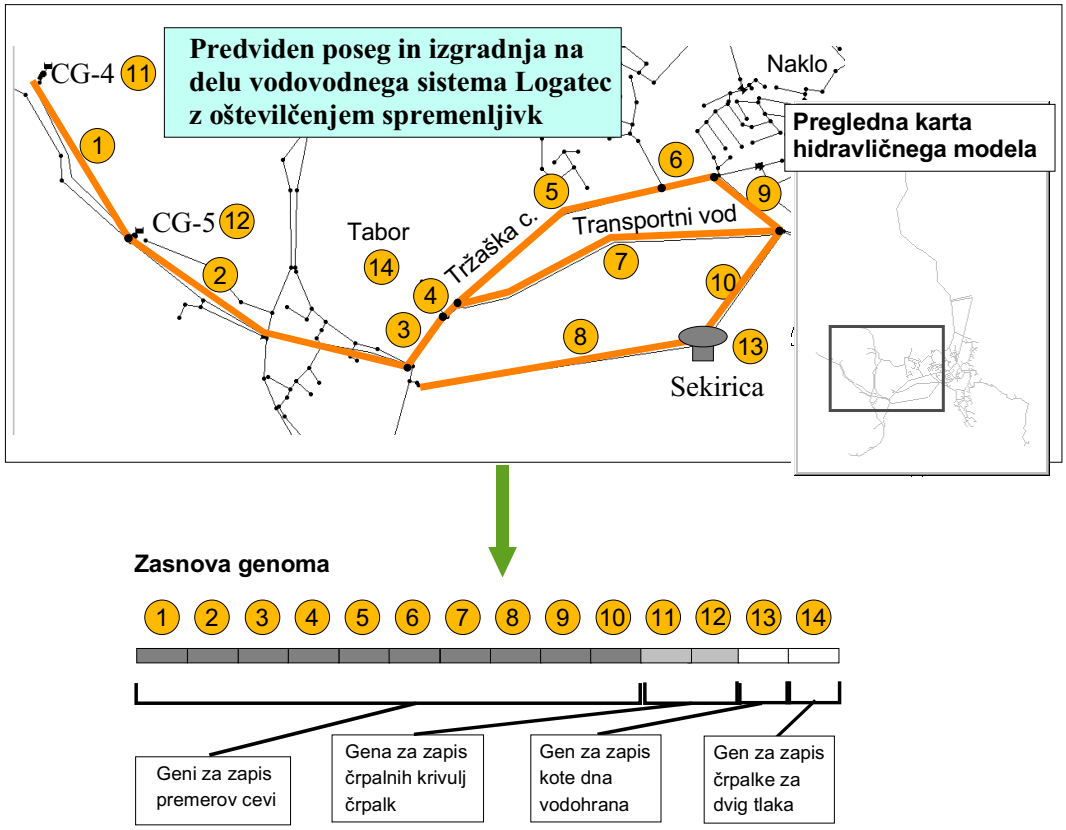
Pomembnejši kriteriji imajo strmejše funkcije, kar vnaša prisilo, da naj bi bila iskana rešitev čim bližje zaželeni (npr. predpisani) vrednosti. Glede na uporabljen način zapisa funkcij ocenjevanja je zato najsprejemljivejša rešitev najbolje ocenjena, kadar po vseh kriterijih v seštevku prejme najnižjo oceno.

Za uvrstitev različnih kriterijev v posamezna polja je bilo ključno sodelovanje strokovnjakov

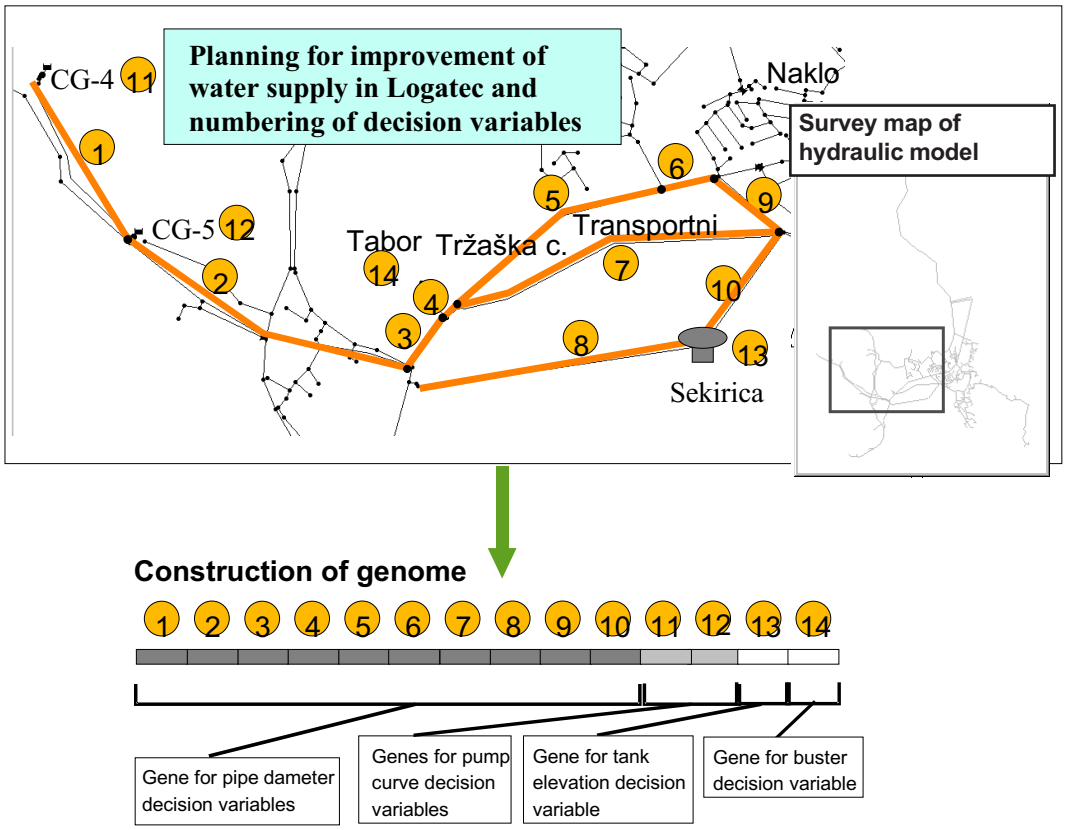
In our case, we deal with a multi-objective function composed of many normalised objective functions. We used the weighting of a particular objective function with regard to its significance (Fig. 6). For example, the requirements of the supply are defined as the primary criterion since they have to be fulfilled although they may have (e.g. financially) unfavourable consequences. In the case of a force majeure (e.g. cut-out of a part of the network, fire, etc.), the requirements do not have to be completely fulfilled, so they can be weighted with a lower criterion.

More important criteria have steeper functions, which forces the optimisation process to subordinate to criteria with greater significance. Due to the described multiobjective function, the optimum solution is the one with the better »score«.

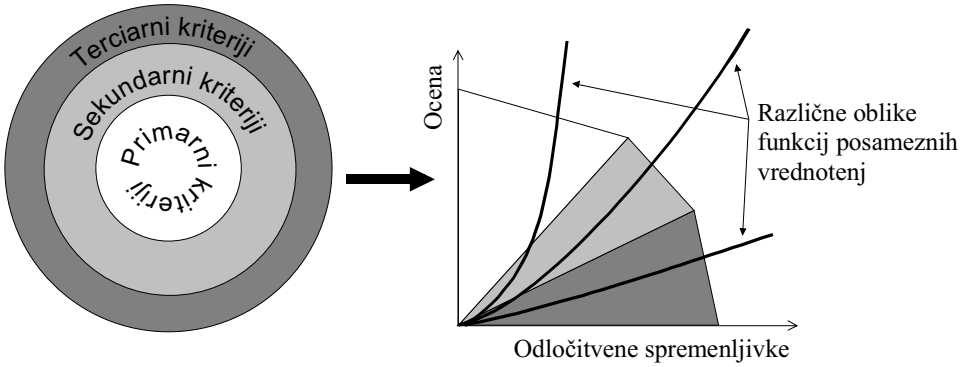
In order to arrange different criteria with regard to their significance and define the terms,



Sl. 5. *Prikaz izbranih odločitvenih spremenljivk in zasnove genoma*



Sl. 5. *Determination of decision variables and genome structure*



Sl. 6. *Shematični prikaz opredelitve funkcij vrednotenja (funkcije fitnes)*

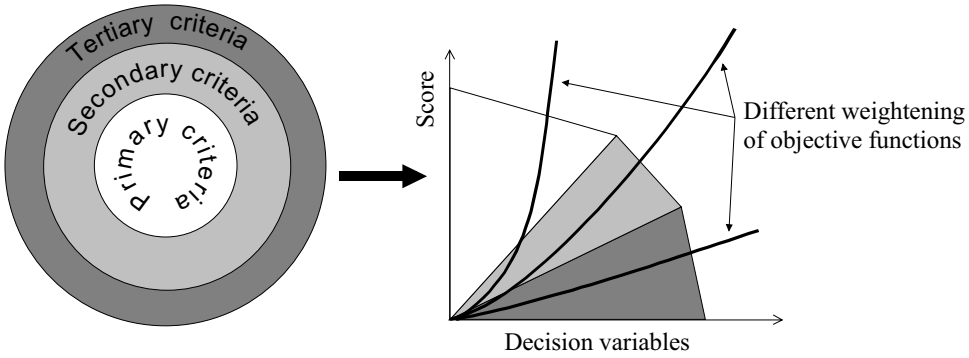


Fig. 6. *Weighting of a particular objective function with regard to its significance*

komunalnega podjetja Logatec, poznavalcev sistema (in robnih pogojev). Ti kriteriji so praviloma unikatni, saj se na vsakem sistemu kaže pomembnost posamezne funkcije z vidika različnih ciljnih skupin (uporabnikov, upravljavca ipd.). Za vrednotenje posameznega genoma smo upoštevali naslednje kriterije ocenjevanja (sl. 7):

Primarni kriteriji:

- ustreznost izračunanih tlakov v šestih reprezentativnih nadzornih točkah sistema (sl. 8 in 9), pri dveh načinih obratovanja sistema, z obtežbo pri največji urni porabi, v dnevu z največjo dnevno porabo. Pri prvem načinu obratovanja sta bili črpalki CG-4 in CG-5 izključeni, zato se je celoten sistem oskrboval iz vodohrana Sekirica, v drugem načinu obratovanja pa sta obe črpalki delovali;
- omejitev črpanja iz posamezne vrtine (CG-4 do 20 l/s, CG-5 do 30 l/s; Hidroinženiring,1998), saj je izdatnost vodnega vira omejena. Zato so genomi, pri katerih bi se po hidravličnem izračunu pojavilo večje črpanje od izdatnosti vodnjakov, dobili dodatne slabe ocene.

Kot primerjalne (ustrezne) vrednosti smo upoštevali standarde oskrbe (Uradni list RS št. 52/99), ki določajo zahtevane tlake. Čeprav naj se želeni tlaki gibljejo med 2 in 7 bar (povprečje 4,5 bar), ima lahko povišanje tlaka, glede na sedanje stanje tlakov, tudi negativne posledice (npr. preobremenitev hišnih vodovodnih inštalacij). Zato je predvideno, da so najustreznejši tlaki (z najugodnejšo oceno) pri vrednosti 4 bar (sl. 7).

Sekundarni kriteriji:

- velikost stroškov gradnje cevovoda, črpališča in

it was important to take into account different areas of interests. Because of specific requirements (consumers, management, etc.), those criteria can vary considerably from case to case. The multi-objective function consists of (Fig. 7):

Primary criteria:

- pressure requirements for normal supply measured in 6 representative controlling nodes (Fig. 8 and 9) in two conditions of operation of the system (at peak consumption of water). In the first condition, pumps were shut down, so the whole system was supplied from the Sekirica tank, whereas in the second case the pumps were open,
- restrictions on the pumped amount of water from wells (CG-4 to 20 l/s, CG-5 to 30 l/s; Hidroinženiring,1998). The genomes, whose decision-variable values showed a higher amount of pumped water, got an extra penalty.

In addition to the defined standards (Official Journal of RS, št. 52/99) for pressure requirements (average value at 4.5 bars), specific requirements were also taken into account. The existing pressures in the main area of Logatec are much lower, so the elevation of pressure could have negative consequences (for example, on internal installations). That is why we determined optimum pressures at 4 bars (Fig. 7).

Secondary criteria:

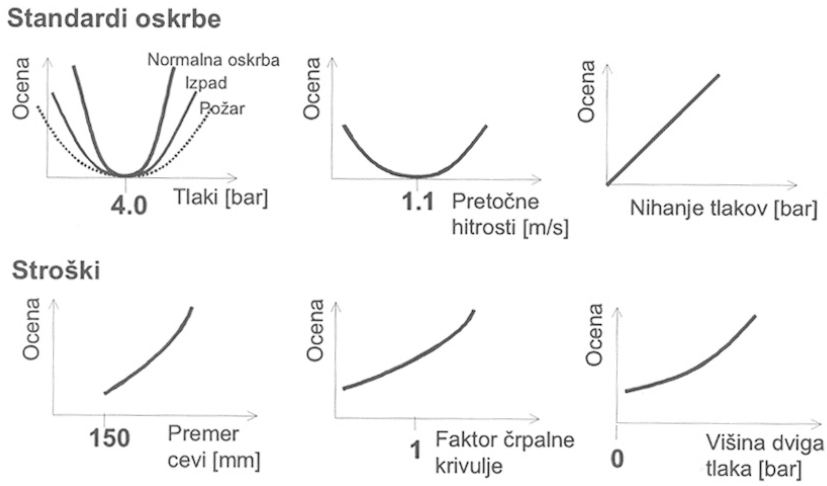
- construction costs of the pipe network, pump sta-

črpalke za lokalni dvig energije. Ker je bil na območju Tržaške ceste pred kratkim obnovljen cevovod (Φ 200 mm), genomi, ki imajo zapis premera 200 mm na tem delu vodovoda, nimajo prištetih novo nastalih stroškov na tem delu vodovoda;
- ustreznost izračunanih tlakov tudi v izrednih razmerah, enkrat za primer požara, ki obremeni odvzem na območju Nakla (sl. 5; 500 m.n.v.) s požarno porabo 10 l/s, pri čemer bi se sistem oskrboval samo iz vodohrana, drugič pa v primeru izpada cevovoda, ki bi se zgodil na območju Tržaške ceste, ali pa izpada transportnega cevovoda (sl. 5).

Terciarni kriteriji:
- ustreznost izračunanih hitrosti vode v cevovodih glede na že omenjene standarde oskrbe;
- spreminjanje tlakov v posamezni kontrolni točki, ki se pojavijo pri različnih obratovalnih stanjih na vodovodnem sistemu.

tions and the buster. Pipelines along the Tržaška road have already been replaced by a diameter of 200 mm. So, the genomes which carried those values of diameter (200 mm) for that part of the network, were not penalised.
- pressure requirements for force majeure. First case with a fire situation in the area Naklo with an extra consumption of water (10 l/s) and with a duration of one hour (supply only from the Sekirica tank). And the second case with a cutout of the network in the area of the Tržaška road, and separately in the area of the transportation pipeline (Fig. 5).

Tertiary criteria:
- requirements for flow velocities,
- oscillation of pressure during a day.



Sl. 7. *Prikaz načina ocenjevanja posameznih genomov (oblike funkcij vrednotenja)*

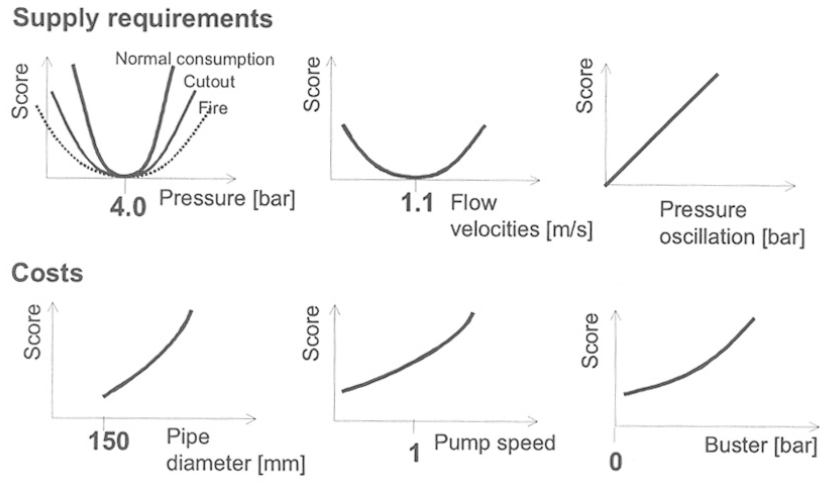


Fig. 7 *Objective functions*

3.2 Prikaz rezultatov

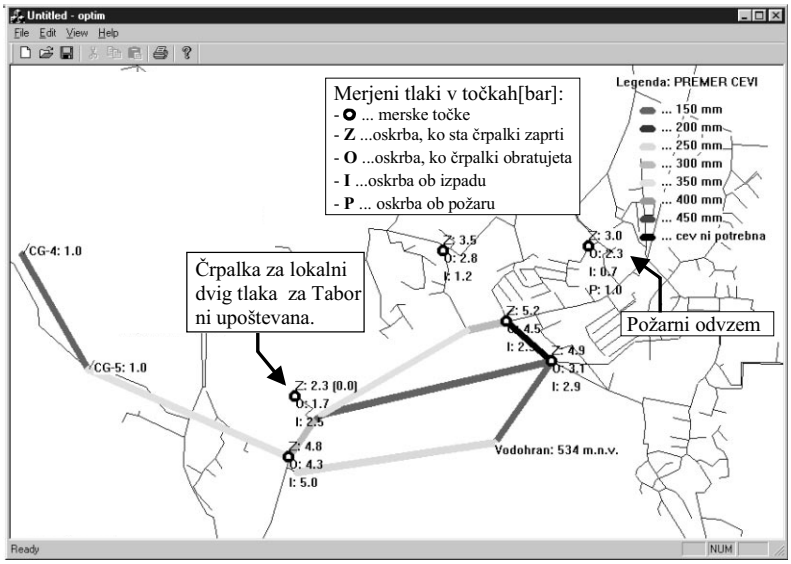
Na slikah 8 in 9 sta prikazana dva rezultata optimizacije. Oba imata enako začetno populacijo, kar pomeni, da sta obe optimizaciji imeli enako polje začetnih rešitev, razlika med njima je v tem, da v prvem primeru (sl. 8) ni dodane črpalke za lokalni dvig energije na območju Tabor. Zagotavljanje standarda oskrbe na višje ležečih območjih, še posebno območja Tabora (510 m.n.v.), kjer je le nekaj stanovanjskih objektov, bi morda bilo negospodarno, zato je preverjena še druga možnost, z vgradnjo dodatne črpalke.

Pokazalo se je, da je pri prvi različici kota vodohrama nekoliko višja, kakor je bilo to ugotovljeno v dosedanjih študijah (projektih). To je predvsem posledica doslednega izpolnjevanja standardov oskrbe in posledica dejanskih naravnih danosti, saj je razgibanost terena na tem območju precej živahna (od 480 do 510 m.n.v).

3.2 Presentation of the results

Fig. 8 and 9 present two results of the optimisation. In both cases the optimisation started with the same initial population (same stock of values for each decision variable). The difference between the two cases is that the first case (Fig. 8) did not take into account the local buster in the area of Tabor. In the second case, the buster for Tabor was added since the area is not very populated (only a few residential houses) and would therefore it would not be economic to raise pressures for the whole system (higher costs) in order to satisfy the supply requirements in such a small area.

The results show that the Sekirica tank would have to be higher, as was planned in the previous studies. This is due to pressure requirements, since the configuration of the relief of the town of Logatec is quite varied (from 480 to 510 m.a.s.l.).



Sl.8. *Prikaz rezultata optimizacije brez vključitve črpalke za lokalni dvig tlaka*

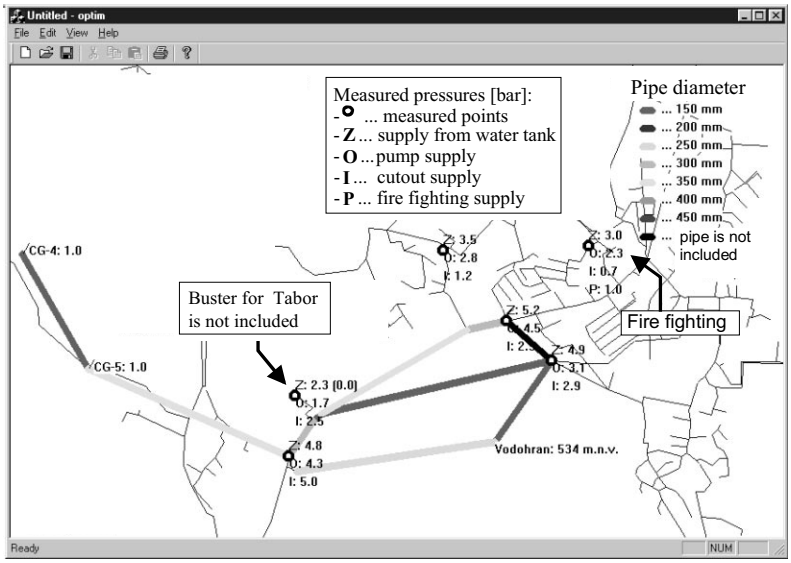
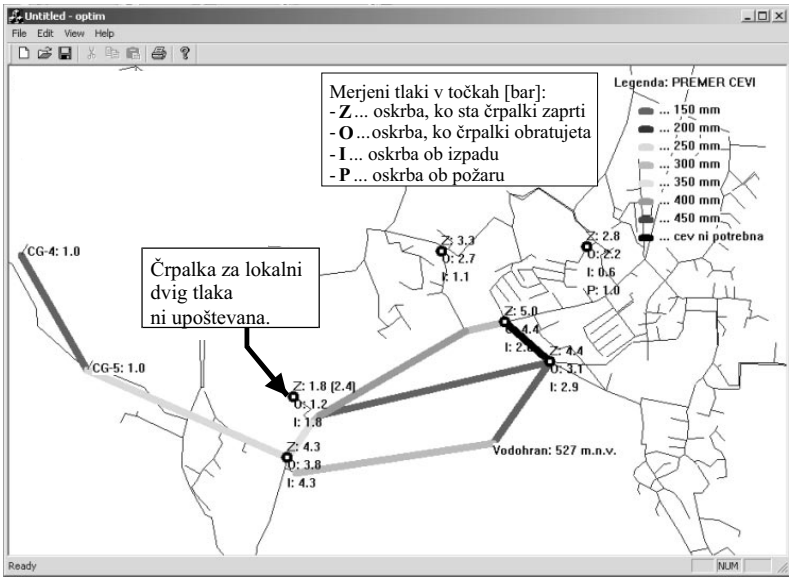


Fig.8. *Result of the optimisation without local buster included*



Sl. 9. *Prikaz končnega rezultata optimizacije z vključitvijo črpalke za lokalni dvig tlaka*

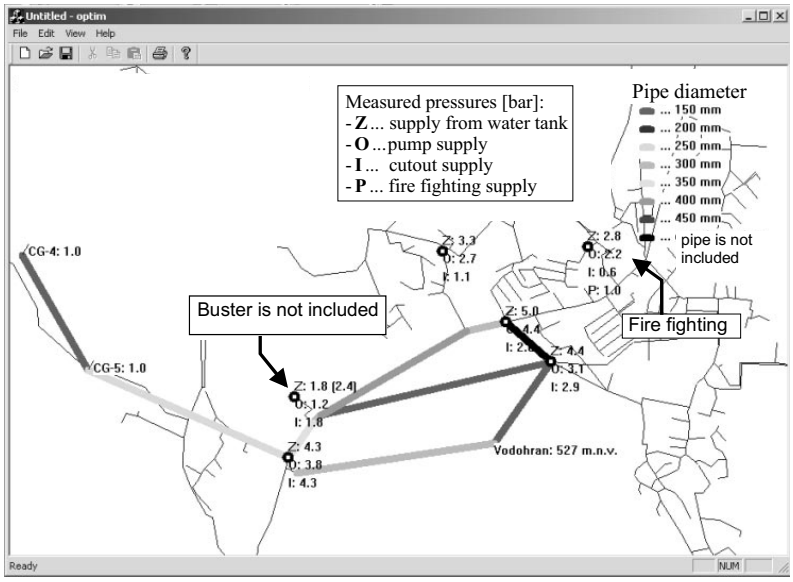


Fig. 9. *Result of the optimisation with local buster included*

Na sliki 9 lahko vidimo, da je izračunana višinska lega vodohrana sedaj za 7 m nižja, nižji kakor v prvem primeru so tudi tlaki v nadzornih točkah, pri več cevovodih pa so potrebni tudi manjši premeri cevi. Izračunana rešitev pa je precej nepričakovana na delu cevodovoda po Tržaški cesti, ki je bil pred kratkim obnovljen, saj tam zahteva večji premer cevi. Vgradnja dodatne črpalke v dosedanji dokumentaciji ni bila obravnavana.

Rezultati so nekoliko drugačni od dosedanjih, kar je predvsem posledica funkcije vrednotenja, ki kot primarni kriterij upošteva (predpisane) standarde oskrbe in ne cilja, z (pre)malo denarja v čimvečji meri izboljšati delovanje sistema. To pa pove tudi, zakaj je predmet nadaljnjega dela predvsem raziskava in natančnejša opredelitev (merljivih) funkcij vrednotenja in morebitnih medsebojnih povezav med kriteriji, ki so bili upoštevani. Kakor je prikazano na sl. 1, opravljeno delo pomeni le vstop v nov krog, le da tokrat z že izdelanim GA-net orodjem.

Fig. 9 shows that the elevation of the tank is much lower than in the first case. Also, pressures in the control nodes are closer to the optimum value and some pipe diameters are reduced. The presented solution is quite unexpected for this part of the network (diameters of pipes along the Tržaška road), although the pipelines have already been replaced (and the optimisation resulted in larger diameters for that area).

Before a complete integration of the GA as decision-support tool can take place, additional research on the arrangement of different criteria with regard to their significance have to be carried out. Especially on the economic terms, where also the life-cycle costs have to be integrated in the optimisation processes [1].

4 SKLEP

Podan je pregled uporabnosti GA, ki so se v tujini že izkazali kot uspešni na različnih področjih, tudi na področjih hidrotehnike (za načrtovanje obnove sistemov, lociranje izgub v sistemu ipd.). Uporaba na področju oskrbe z vodo je prenos novih znanj v Slovenijo, hkrati pa prispevek nekaterih izvirnih rešitev.

Povezovanje več orodij v GA-net se je izkazalo kot zelo uporabno. Poleg optimizacije posegov za izboljšanje delovanja sedanjih sistemov za predlagane razvojne scenarije itn. pa se odpirajo še druga področja, kakor so analiza tveganj, analiza pomembnosti delov sistema, analiza občutljivosti (npr. stroškov in koristi), področje ocenjevalnih kriterijev ipd. Doseženi rezultati, prikazani na strokovnih srečanjih v tujini, so že bili zadostni za povabilo k izvedbi mednarodega projekta WASYMO [17].

4 CONCLUSION

This paper shows the applicability of genetic algorithms, which have proved to be effective in many cases in the world (planning the renovations of systems, leakage detections, calibrations, etc.). The application of the GA in Slovenia represents a transfer of new knowledge and a contribution of some creative solutions to the area of optimisation problems.

The connection of different tools (like GA-net) has proved to be very useful. There are many new research areas which can also be integrated (cost-benefits, risk analysis, definition of importance of areas of a system, etc.). The achieved results, presented at an expert meeting abroad, contributed to the invitation of our group to join the international project WASYMO [17].

5 LITERATURA
5 REFERENCES

[1] Kleiner, Y., B.J. Adams, and J.S. Rogers (2000) Water distribution network renewal planning. *Journal of computing in civil engineering*.

[2] Hamam, Y.M, and A. Brameller (1971) Hybrid method for the solution of piping networks. *Proc. IEE*, Vol. 113, No. 11, 1607-1612.

[3] Steinman, F.P. Banovec in S. Šantl (sprejet v objavo 2001) Uporaba genetskih algoritmov pri načrtovanju in upravljanju vodovodnih sistemov, *Gradbeni vestnik*.

[4] Salgado, R., E. Todini and P.E. O'Connel (1988) Extending the gradient method to include pressure regulating valves in pipe networks. *Proc. Inter. Symposium on Computer Modeling of Water Distribution Systems,* University of Kentucky.

[5] Todini, E., S. Pilati (1987) A gradient method for analysis of pipe networks. *International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution*, Leicester Polytechnic, UK.

[6] Banovec, P., S. Šantl (2000) Kalibracija in optimizacija vodovoda z genetskimi algoritmi, *Zbornik 11.Mišičev vodarski dan*, str. 138.

[7] Halhal, D.(1998) Optimal improvement of water distribution systems, The PhD thesis, University of Exeter.

[8] Banovec, P.(2000) Direktiva o skupni politiki do voda in modeliranje.

[9] Osiadacz, A.J.(1987) Simulation and analysis of gas networks. *E. & F.N. Spon*, London.

[10] Đorđević, B.(1990), Vodoprivredni sistemi, Optimizacija vodoprivrednih sistema – metode i primena, 198 – 236.

[11] Steinman, F. (1992) Hidravlika, *UL-FGG*, učbenik.

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

[13] Rossman, L. A. (2000) EPANET 2 – USERS MANUAL, United States – Environmental Protection Agency (EPA). (http://www.epa.gov/ordntrnt/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html)

[14] Vključitev vrtin v Cuntovi grapi v vodovodni sistem Logatec, PGD, PZI, Hidroinženiring d.o.o., št. proj. 40-173-00/99 (tudi Osnove za izdelavo lokacijske dokumentacije) , maj 1998.

[15] Uradni list RS št. 32/93, Zakon o gospodarskih javnih službah.

[16] Uradni list RS št. 52/99, Pravilnik za projektiranje, tehnično izvedbo in uporabo javnega vodovodnega sistema.

[17] Savic D. A. et all. (2001) Water supply and distribution systems modelling and optimisation (WASYMO), Research Training Network, EU, IHP-RTN-00-2.

Naslova avtorjev: prof.dr. Franci Steinmann
dr. Primož Banovec
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Hajdrihova 28
1000 Ljubljana

Sašo Šantl
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova 2
1000 Ljubljana

Authors' Addresses: Prof.Dr. Franci Steinman
Dr. Primož Banovec
University of Ljubljana
Faculty of Civil and Geodetic Engineering
Hajdrihova 28
1000 Ljubljana, Slovenia

Sašo Šantl
University of Ljubljana
Faculty of Civil and Geodetic Engineering
Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenia

Prejeto: 2.7.2001
Received:

Sprejeto: 12.10.2001
Accepted: