

Primljen / Received: 4.12.2015.

Ispravljen / Corrected: 9.10.2016.

Prihvaćen / Accepted: 20.12.2016.

Dostupno online / Available online: 10.1.2018.

Genetski algoritam za mreže s dinamičkom mutacijom

Autori:



Doc.dr.sc. **Tulin Cetin**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Celal Bayar
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
tulin.cetin@cbu.edu.tr



Prof.dr.sc. **Mehmet Ali Yurdusev**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Celal Bayar
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
yurdusev@cbu.edu.tr

Prethodno priopćenje

Tulin Cetin, Mehmet Ali Yurdusev

Genetski algoritam za mreže s dinamičkom mutacijom

Projektiranje oborinskih i sanitarnih sustava odvodnje temelji se prvenstveno na odluci o mrežnom sustavu i na hidrauličkim proračunima za cijevi koje će se koristiti u mreži. U radu se analizira genetski algoritam baziran na hidrauličkoj optimizaciji kako bi se postigli najniži troškovi te najprikladniji promjeri cijevi i najpovoljnije vrijednosti uzdužnog nagiba. Predlaže se novi algoritam za provedbu mutacije, nazvan "metoda dinamičke mutacije", kako bi se smanjio broj ispitivanja parametara genetskog algoritma, što se naročito odnosi na brzinu mutacije, te postigla optimalna vrijednost u što kraćem razdoblju.

Ključne riječi:

genetski algoritam, mreže oborinsko-sanitarne odvodnje, optimizacija, hidrauličko projektiranje

Preliminary report

Tulin Cetin, Mehmet Ali Yurdusev

Genetic algorithm for networks with dynamic mutation rate

A genetic algorithm based on hydraulic optimization is applied in the paper in order to achieve the lowest possible costs, the most appropriate pipe diameter, and the most favourable longitudinal slope values. A new algorithm for mutation operation, called the dynamic mutation rate method, is proposed as a means to reduce the number of trials for genetic algorithm parameters, especially for mutation rates, and to obtain an optimum value in the shortest possible time.

Key words:

genetic algorithm, storm-sewer networks, optimization, hydraulic design

Vorherige Mitteilung

Tulin Cetin, Mehmet Ali Yurdusev

Genetischer Algorithmus für Netzwerke mit dynamischer Mutation

In der Arbeit kommt ein genetischer Algorithmus zur Anwendung, der auf einer hydraulischen Optimierung beruht, um das günstigste Kostenverhältnis zu erreichen, den angemessensten Rohrdurchmesser und die günstigsten Werte der Längsneigung zu ermitteln. Es wird ein neuer Algorithmus zur Umsetzung der Mutation bzw. die „Methode der dynamischen Mutation“ vorgeschlagen, um die Zahl der Untersuchungen der Parameter des genetischen Algorithmus zu reduzieren, was sich in erster Linie auf die Geschwindigkeit der Mutation bezieht, sowie zur Ermittlung von optimalen Werten.

Schlüsselwörter:

genetischer Algorithmus, Entwässerungsnetzwerke, Optimierung, hydraulische Planung

1. Uvod

Sanitarni i oborinski sustavi odvodnje izravno utječu na javno zdravlje i sigurnost, te se stoga smatraju jednim od značajnijih područja građevinarstva [1]. Gradnja nove mreže povezana je s velikim troškovima, a i ometa normalan život stanovnika. Složenost postupka projektiranja i potreba za smanjenjem troškova uvjetovali su primjenu i razvoj brojnih postupaka za optimizaciju postupka projektiranja infrastrukturnih građevina. Sanitarni i oborinski sustavi odvodnje sastoje se od revizijskih okana i cijevi, koji se zajednički projektiraju kao cjelovita mreža. Projektiranje sustava sanitarne i oborinske odvodnje može se istraživati u dvije faze: donošenje odluke o izvođenju mrežnog sustava (planiranje) te hidrauličko projektiranje cijevi u okviru mreže [2-7]. To uključuje proračun protoka, brzine, promjere cijevi, nagibe i dubine postavljanja cijevi, te izvođenje pomoćnih konstrukcija.

Osnovna namjena infrastrukturnih sustava sastoji se u odvodnji do točke ispusta, koristeći pritom cijevi i pomoćne konstrukcije. To se ostvaruje na temelju inženjerskog iskustva. Međutim, u sustavima postoje brojna ograničenja pa stoga usvajanje različitih vrijednosti za isti parametar dovodi do generiranja različitih troškova. Stoga se može reći da se svrha sustava ne sastoji isključivo od postizanja prikladne odvodnje. Sustavi se projektiraju kako bi se usvojilo prikladno rješenje uz najniže moguće troškove. Očito je da se za to uz tradicionalne metode trebaju primjenjivati i odgovarajući optimizacijski postupci. Mnogi se istraživači koriste različitim metodama za optimiziranje hidrauličkog sustava, a jedna od njih su i genetski algoritmi. Genetski algoritam utemeljen na postizanju najnižeg troška nakon odgovarajućeg broja ispitivanja omogućuje nam dobivanje potrebnog rješenja iznalaženjem globalnog optimalnog minimuma tj. maksimuma.

Siriwardene i Perera [8] proučavaju utjecaj parametara koji se koriste u genetskom algoritmu u svrhu hidrauličke optimizacije. Afshar [9] i Pianese i dr. [10] koriste genetski algoritam za optimizaciju hidrauličkog sustava. Brand i Ostfeld [11] usmjereni su na primjenu genetskog algoritma za hidrauličku optimizaciju i za optimizaciju sustava za pročišćavanje otpadnih voda. Afshar [12] nudi primjenu tehnike ponovnog stvaranja (eng. *rebirthing*) zbog poteškoća u diskretnom kodiranju kontinuiranih parametara. Haghighi i Bakhshipour [13] koriste "prilagodljivi binarni genetski algoritam" kako bi izbjegli primjenu vrijednosti kažnjavanja u genetskom algoritmu pri optimizaciji hidrauličkih sustava. Cimorelli i dr. [14] primjenjuju genetski algoritam za projektiranje ne samo mreže nego i hidrauličkog sustava. Ogidan i Giacomoni [15], Zimmer i dr. [16], Afshar i dr. [17] i Beraud i dr. [18], također primjenjuju genetski algoritam za potrebe optimizacije.

Neki istraživači isključivo koriste genetski algoritam, dok ga drugi koriste u okviru hibridnih algoritama. Weng i dr. [2] te Weng i Liaw [3] koriste "model za optimizaciju kanalizacijskog sustava za planiranje razmještaja i hidrauliku /SSOM/LH" u svrhu projektiranja mreže i hidrauličkog sustava. Radi se o

kombiniranom modelu koji u sebi sadrži genetski algoritam. Metoda SSOM ili "metoda mješovitog cjelobrojnog programiranja 0-1" te "metoda ograničenog implicitnog nabiranja (BIE)" primjenjuje se u izračunavanju veličine i nagiba. Weng i dr. [2], Weng i Liaw [3] i Guo i dr. [19] primjenjuju "stanične automate" (eng. *cellular automata* - CA), tj. vrstu optimizacijskog postupka koji se temelji na organiziranju susjednih odnosa, a dobiveni rezultati služe kao ulazni podaci u genetskom algoritmu. Cilj je toga postupka smanjiti vrijeme računanja tako da se za genetski algoritam pripremi vrlo kvalitetna generacija. Pan i Kao [20] razvili su hibridnu metodu za projektiranje mreže za odlaganje otpadnih voda u kojoj koriste programiranje drugog stupnja, tj. matematičku metodu za interno rješavanje, dok se genetski algoritam koristi za vanjsko rješavanje (model QP-GA). Rohani i Afshar [21] i Liang i dr. [22] koriste genetski algoritam u kombinaciji s drugim algoritmima.

U ovom se istraživanju hidraulička optimizacija provodi pomoću genetskog algoritma kako bi se troškovi sveli na minimum te dobile najprikladnije vrijednosti promjera cijevi i uzdužnog nagiba. Za te se potrebe ispituju razni parametri genetskog algoritma te se za provedbu mutacije predlaže novi algoritam.

2. Hidrauličko projektiranje sustava oborinske i sanitarne odvodnje

U okviru hidrauličkih proračuna najprije treba izračunati protok na ulazu u cijev. Taj se protok uglavnom temelji na količini otpadnih voda u sanitarnim sustavima, te na količini oborina u oborinskim sustavima. Proračun protoka ne ulazi u okvir ovog istraživanja, pa se ovdje prihvaća da su već na početku poznate vrijednosti tog protoka.

Hidraulički proračuni oborinskih i sanitarnih sustava odvodnje provode se na principima hidraulike tečenja u otvorenim vodotocima. Na početku se provodi proračun brzine pod pretpostavkom da je cijev puna te se nakon toga izračunava protok pri potpuno ispunjenoj cijevi [23]. Zatim se iskazuje jednadžba kontinuiteta izrazom (1):

$$Q_0 = V_0 \cdot A \quad (1)$$

gdje je Q_0 protok pri potpuno ispunjenoj cijevi, V_0 je brzina pri potpuno ispunjenoj cijevi, dok je A površina poprečnog presjeka cijevi.

U literaturi se za proračun brzine toka pri potpuno ispunjenim cijevima primjenjuje nekoliko formula. Neke od njih su formule koje predlažu Manning, Kutter, Prandtl-Colebrook, Hazen-Williams i Darcy-Weisbach. Udruga ASCE [24] preporučuje upotrebljavati Darcy-Weisbachove jednadžbe za proračun otpora tečenju u otvorenim kanalima, a Liou [25] ne preporučuje Hazen-Williamsove jednadžbe. Iako se prema podacima iz literature može zaključiti da većina autora prednost daje Manningovoj formuli [11-14, 19-22, 26], u ovom se istraživanju uzimaju u obzir sve spomenute formule za izračunavanje brzine. Dakle, upotrebljavaju se formule koje predlažu:

$$\text{Manning: } V_D = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{Kutter: } V_D = \frac{100R\sqrt{J}}{m + \sqrt{R}}$$

$$\text{Prandtl-Colebrook: } V_D = -2 \log \left(\frac{2,51\nu}{D \cdot \sqrt{2gDJ}} + \frac{k/D}{3,71} \right) \cdot \sqrt{2gDJ} \quad (4)$$

$$\text{Hazen-Williams: } V_D = 0,849 C_{hw} R^{0,63} J^{0,54} \quad (5)$$

$$\text{Darcy-Weisbach: } J = \frac{f Q^2}{8gRA^2} \quad [27] \quad (6)$$

U navedenim se formulama koriste sljedeći parametri:

V_D - brzina pri potpuno ispunjenom cjevovodu [m/s]

R - hidraulički polumjer [m]

D - promjer [m]

J - uzdužni nagib

A - površina poprečnog presjeka cijevi [m²]

Q - protok u cijevi [m³/s]

n - Manningov koeficijent hrapavosti [s/m^{1/3}]

m - hrapavost prema Kutteru

ν - kinematička viskoznost [m²/s]

k - Prandtl-Colebrookov koeficijent hrapavosti [m]

g - gravitacijska akceleracija [m²/s]

C_{hw} - Hazen-Williamsov koeficijent trenja

ε - Darcy-Weisbachova visina neravnina [m].

Promjeri i protoci izračunavaju se primjenom neke od tih formula za izračunavanje brzine [28].

(2) poznati podaci o rasporedu cijevi i protocima. Cilj je odabrati dimenzije cijevi između revizijskih okana za odgovarajuće dubine polaganja cijevi.

(3) Usvojeno je da sve karakteristike mreža oborinsko-sanitarne odvodnje nisu konstante, tj. da su preuzete sa samog projekta. Drugim riječima, program može obrađivati sve vrijednosti koje se javljaju na stvarnim projektima oborinsko-sanitarne odvodnje. Uz geodetske uvjete potrebne za crpne stanice, u obzir su također uzeti i svi ostali geodetski uvjeti kao što su strmiji uzdužni nagibi ili izuzetno ravan teren. To omogućuje primjenu programa na bilo kojem stvarnom primjeru bez ikakvih ograničenja ili primjene specifičnih pretpostavki koje se odnose na pojedinačne projekte. Genetski algoritam je postupak pretraživanja i optimizacije koji se temelji na prirodnom odabiru. Nakon križanja i mutacije populacije N kromosoma, dobiva se nova generacija. Opći dijagram genetskog algoritma prikazan je na slici 1.

Optimalno rješenje traži se uspoređivanjem ukupnih troškova sustava. Formule koje slijede koriste se za izračunavanje troškova građenja projekata oborinske i sanitarne odvodnje:

$$\text{Ukupna cijena cijevi} = \sum_{i=1}^N L_i \cdot M_{\text{pipe}} \quad (9)$$

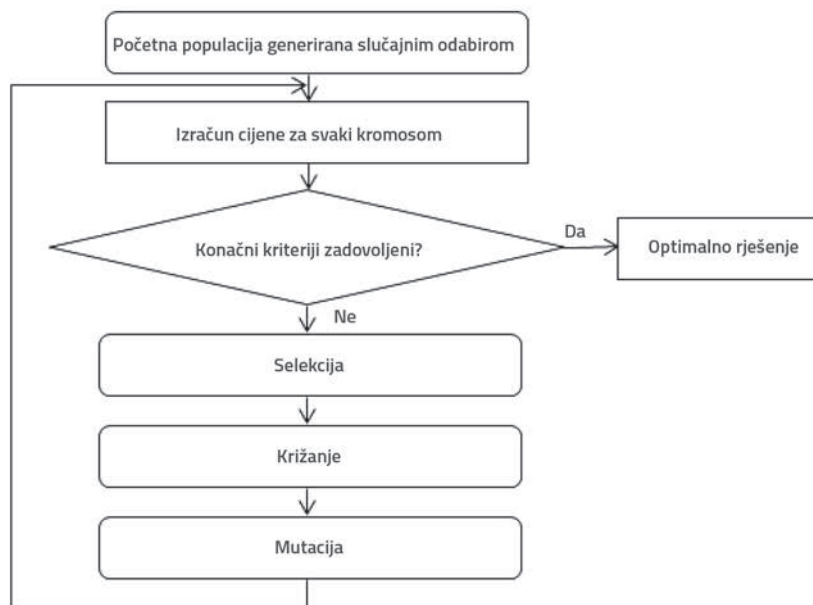
$$\begin{aligned} \text{Ukupna cijena revizijskog okna} = \\ = \sum_{i=1}^{N-1} h_{\text{avg_manhole}_i} \cdot M_{\text{manhole_to_depth}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Ukupna cijena iskopa} = \\ = \sum_{i=1}^N L_i \cdot h_{\text{avg_pipe}_i} \cdot M_{\text{burying}} + \sum_{i=1}^{N-1} h_{\text{avg_manhole}_i} \cdot M_{\text{burying}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Ukupna cijena mreže} = \text{ukupna cijena cijevi} \\ + \text{ukupna cijena revizijskih okana} \\ + \text{ukupna cijena iskopa} \end{aligned} \quad (12)$$

3. Optimizacija hidrauličkih proračuna

Za optimizaciju hidrauličkih proračuna na bazi genetskog algoritma razvijen je odgovarajući računalni program. Ulazni podaci za taj program su informacije o revizijskim oknima i cijevima između tih okana, a uključuju osnovne karakteristike mreža oborinsko-sanitarne odvodnje ili mreža javne odvodnje kao što su: visinski odnosi, dužine, protoci i točke ispuštanja, vrste cijevi, promjeri koji se mogu koristiti na projektu, minimalni i maksimalni dopušteni uzdužni nagibi, minimalne i maksimalne dubine iskopa, protoci za svaki promjer, podaci o revizijskim oknima, količine potrebne za procjenu, te troškovi za svaku stavku projekta [29]. Optimizacija mreže, tj. raspored revizijskih okana, ne ulazi u područje interesa ovog rada. Zato su podaci o projektiranju mreže i rasporedu revizijskih okana preuzeti sa stvarnih projekata. Pretpostavljeno je da su već



Slika 1. Opći dijagram genetskog algoritma

gdje je N ukupan broj dionica u mreži, L_i je udaljenost između susjednih revizijskih okana, M_{pipe} je jedinična cijena po metru cijevi, $M_{manhole_to_depth}$ je jedinična cijena po metru dubine revizijskog okna, $h_{avg_pipe_i}$ je prosječna dubina svake dionice, $h_{avg_manhole_i}$ je prosječna dubina svakog revizijskog okna, $M_{burying}$ je jedinična cijena po metru dubine iskopa. Kao što se vidi iz jednadžbe (12), troškovi ukupne mreže pokrivaju samo cijevi, revizijska okna i iskope. Ukupni troškovi pomoćnih konstrukcija koje se trebaju izvesti unutar sustava nisu uključeni u proračun ukupnih troškova prikazan u [5, 30-34]. U ovom je radu usvojeno da nema pomoćnih konstrukcija kao što su crpne stanice, kišni preljevi, retencije itd. Kada bi se te konstrukcije uključile u sustav, njihovi troškovi dodali bi se ukupnim troškovima mreže. Međutim, cilj ovog rada jest iznalaženje optimalnog promjera cijevi te optimalnog uzdužnog nagiba kao u radovima [5, 30-34], bez utjecaja drugih konstrukcija.

Dva osnovna elementa koji izravno utječu na troškove su promjer cijevi i količina iskopa koja se definira kao dubina iskopa. Dubina iskopa određuje se uzdužnim nagibom cijevi. Stoga su promjer cijevi (D) i nagib (S) korišteni kao parametri u postupku hidrauličke optimizacije. Vrijednosti D i S su generirane nasumce kao binarne vrijednosti u programu s različitim dužinama ovisno o dopuštenim vrijednostima koje se koriste na projektima za svaki kromosom. Stoga je za svaki parametar dobivena drugačija točnost.

Dužina niza binarne vrijednosti promjera cijevi (D) određena je ukupnim brojem primjenjivih promjera cijevi. Na primjer, ako je na projektu dopušteno 10 (D) različitih promjera cijevi, tj. 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400 i 1800 mm, tada je za binarno predstavljanje promjera korišteno 4-bitno prikazivanje. Dužina niza binarne vrijednosti nagiba (S) određena je razlikom između dopuštenih minimalnih i maksimalnih vrijednosti nagiba dopuštenih promjera. Na primjer, ako uzmemo da su vrijednosti $1/300$ i $1/8$ ($1/5$) za cijev promjera 200 mm, te $1/3000$ i $1/75$ ($1/5$) za cijev promjera 1800 mm, odabrane kao minimalne i maksimalne dopuštene vrijednosti nagiba, to znači da bi na projektu moglo biti $3000-8=2992$ (S) različitih vrijednosti nagiba, pa bi bilo prikladno koristiti 12-bitno predstavljanje za binarno prikazivanje nagiba. Binarne vrijednosti promjera i nagiba pretvorene su u realne vrijednosti kako slijedi:

$$D_{calc} = D_{min} + (D_{max} - D_{min}) \cdot D_{random} \quad (7)$$

$$S_{calc} = \frac{1}{S_{max} + (S_{min} - S_{max}) \cdot S_{random}} \quad (8)$$

gdje je D_{min} minimalna vrijednost dozvoljenog promjera cijevi, D_{max} je maksimalna vrijednost dopuštenog promjera cijevi, D_{random} je vrijednost slučajno generiranog promjera u obliku realnog broja, D_{calc} je promjer cijevi izračunan na temelju slučajno generiranih vrijednosti promjera, S_{min} je minimalni dopušteni nagib izračunanog promjera D_{calc} , S_{max} je maksimalni dopušteni nagib izračunanog promjera D_{calc} , S_{random} je slučajno generirani nagib u obliku realnog broja, a S_{calc} je nagib izračunan na temelju slučajno generiranih vrijednosti nagiba.

Slučajne vrijednosti promjera cijevi i nagiba kontrolirane su prije samog proračuna kako bi se odbacile vrijednosti koje dovode do neodgovarajućih rješenja, te da bi se smanjilo vrijeme proračuna, što je poznato kao strategija prilagodbe [13, 20]. Na primjer, promjer cijevi na nizvodnoj dionici ne može biti manji od onog na uzvodnim dionicama na svakom revizijskom oknu. Isto tako visine uzvodnih revizijskih okana trebaju biti veće od visina nizvodnih revizijskih okana, osim ako se ne koriste crpne stanice. Međutim, u ovom je istraživanju usvojeno da se crpne stanice neće uzimati u obzir.

Nakon određivanja vrijednosti slučajnih promjera i nagiba, izračunava se brzina toka u svakoj cijevi odabirom jedne od slijedećih formula za brzinu toka koju predlažu Manning, Kutter, Prandtl-Colebrook, Hazen-Williams i Darcy-Weisbach. Na temelju odabrane formule i vrste cijevi koja će se koristiti na projektu, određuje se koeficijent cijevi uzimajući u obzir dopuštene minimalne i maksimalne vrijednosti brzine (V_{min} i V_{max}). Protok se uspoređuje s protokom koji je dozvoljen za korišteni promjer, a izračunana brzina se uspoređuje s dopuštenim minimalnim i maksimalnim brzinama. Ako kriteriji protoka i maksimalne brzine nisu zadovoljeni, proračun se ponavlja primjenom sljedeće vrijednosti promjera. Ako pak kriteriji za minimalnu brzinu nisu zadovoljeni, proračun se ponavlja primjenom veće vrijednosti nagiba.

Dubine iskopa i visine na vrhu cijevi izračunavaju se na temelju dobivenih vrijednosti promjera i nagiba. Dubine iskopa uspoređuju se s dopuštenim minimalnim i maksimalnim dubinama, a mijenja se nagib dionica kod kojih kriteriji dubine nisu zadovoljeni.

Slučajno generirane vrijednosti zamjenjuju se s usvojenim vrijednostima promjera i nagiba na temelju kriterija koji nalažu odbacivanje onih vrijednosti iz kojih proizlaze neodgovarajuća rješenja.

4. Primjena genetskog algoritma

Nakon hidrauličkog proračuna, provodi se pretraga pomoću genetskog algoritma na temelju početne populacije, kako je to prikazano na slici 1. Naizmjenično se iz odabranih vrijednosti uzimaju parametri genetskog algoritma kao što su veličina populacije, usporedne vrijednosti za algoritam turnirske selekcije, vrijednosti elitizma, metode križanja, vrijednosti križanja i vrijednosti mutacije. Ukupan trošak svakog kromosoma izračunava se na temelju formula prikazanih u nastavku.

U genetskom se algoritmu za odabir roditelja koristi nekoliko metoda. Neke od njih su turnirska selekcija, kotač ruleta, linearno rangiranje i proporcionalna selekcija. Goldberg i Deb [35] navode da se niti jedna selekcijska metoda ne smatra boljom od ostalih. Zato se u ovom programu prednost daje turnirskoj selekciji. Turnirska selekcija uključuje slučajno odabiranje malog podskupa kromosoma (dva ili tri kao broj turnira) iz bazena za reprodukciju, nakon čega se odigrava "turnir". U okviru "turnira", za svaki se podskup generira slučajna vrijednost od 0 do 1, te se zatim ta slučajna vrijednost uspoređuje s posebnom vrijednošću

da bi se dobio koeficijent turnira. Ako je slučajna vrijednost manja od koeficijenta turnira, prvi se kromosom odabire kao odabrani roditelj. Ako je slučajna vrijednost veća od omjera turnira, odabire se drugi kromosom. Turnir se ponavlja za svakog potrebnog roditelja [36].

U programu se za operacije križanja koriste uniformni algoritmi, algoritmi s jednom točkom i algoritmi s dvije točke [36]. Odabrani algoritam križanja koristi se za kromosome promjera i nagiba ovisno o njihovim dužinama bitova.

Operacija mutacije provedena je uzimajući u obzir suprotnost binarnom broju u kromosomu. U ovom je radu broj bita koji ulazi u postupak mutacije u kromosomu definiran slučajnim odabirom. To se obavlja različito za svaki promjer i nagib. U postupku genetskog algoritma uzima se da je brzina mutacije konstantna [8, 9, 20, 36, 37] ili varijabilna, tj. da se linearno povećava od neke vrijednosti [36, 37] ili da se linearno smanjuje od neke vrijednosti [13, 36, 37]. Odabir konstantne brzine mutacije ovisi o pokusima, isto kao i kod odabira drugih parametara genetskog algoritma. Postupak definiranja koja je brzina mutacije optimalna traje suviše dugo, a još se i dodatno treba provesti velik broj pokusa za ostale parametre genetskog algoritma. Kako bi se smanjio broj pokusa, što se naročito odnosi na brzinu mutacije, te da bi se brže utvrdila optimalna vrijednost, u ovom se radu predlaže metoda dinamičke mutacije.

Vrijednosti minimalne i maksimalne brzine mutacije odabrane su kao kontrolne brzine mutacije. Kod pokretanja programa, kao primjenljiva brzina mutacije prihvaća se minimalna brzina mutacije. Kod proračuna za svaku generaciju, najpogodniji se trošak uspoređuje s prethodnim pogodnim troškom. Ako promjena u trošku za susjednih 50 generacija iznosi samo 1 %, tada se primjenljiva brzina mutacije povećava za 1 %. Ako se trošak kod bilo koje generacije promijeni za više od 1 %, kontrolni interval za 50 generacija provodi se ispočetka, a primjenljiva brzina mutacije smanjuje se za 1 %. Brzina mutacije može se povećavati do maksimalne brzine mutacije, a može se smanjivati do minimalne mutacije, primjenom vrijednosti od 1 % [29].

Sve se radnje ponavljaju do ukupnog broja generacija, a taj je broj parametar programa. Na početku istraživanja je broj generacija iznosio 2000 i više. Uočeno je međutim da više od 1000 generacija bitno ne utječe na optimalnu vrijednost. Zato je usvojeno da u svim pokusima broj generacija iznosi 1000.

5. Ogledni primjer

Kako bi se ispitala valjanost programa, u hidrauličkoj je optimizaciji korištena mreža oborinske odvodnje sa stvarnog projekta. Taj je stvarni projekt pripremljen pomoću odgovarajućeg računalnog programa. Korišteni program ne sadrži postupak optimizacije. Stoga je stvaran projekt projektiran samo na temelju inženjerskog iskustva, kao što je to napravljeno i u radu Guo i dr. [38]. Troškovi sa stvarnog projekta uspoređeni su s troškovima koji su dobiveni pomoću programa za hidrauličku optimizaciju.

Korištena mreža oborinske odvodnje dugačka je 15.318 m, a sadrži 193 spojne točke i 192 dionice. Shematski prikaz mreže prikazan je na slici 2. Vrijednosti protoka po dionicama preuzete su iz originalnog projekta. Iz originalnog projekta preuzeti su i promjeri cijevi te dopuštene minimalne i maksimalne vrijednosti nagiba, kao što se to vidi u tablici 1. Korištena je Prandtl-Colebrookova formula brzine, a dopuštene minimalne i maksimalne vrijednosti brzine (V_{min} i V_{max}) iznose 0,50 m/s tj. 5 m/s.



Slika 2. Mreža korištena za kontrolu programa

Tablica 1. Promjeri cijevi i dopuštene vrijednosti nagiba

Promjer [mm]	Minimalni nagib (1/)	Maksimalni nagib (1/)
φ 500	500	15
φ 600	500	15
φ 700	1000	50
φ 800	1000	50
φ 1000	3000	75
φ 1200	3000	75
φ 1400	3000	75
φ 1600	3000	75
φ 1800	3000	75
φ 2000	3000	75
φ 2200	3000	75
φ 2400	3000	75
φ 2600	3000	75
φ 2800	3000	75

Originalna vrijednost troškova bez bilo kakve optimizacije iznosi 2.913.750,00 EUR.

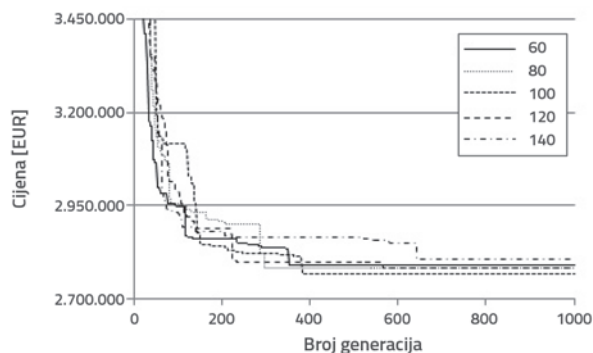
U ovom su istraživanju analizirane različite vrijednosti svakog parametra genetskog algoritma, kao što je to prikazano u Tablici 2. Parametri genetskog algoritma su 60, 80, 100, 120 i 140 za veličinu populacije, 1 %, 3 %, 5 % i 10 % za elitizam, 0,5 i 0,75 za turnirsku vrijednost, za metodu križanja su usvojeni uniformni algoritmi, te algoritmi u jednoj točki i u dvije točke, vrijednosti križanja su 30 %, 50 %, 70 % i 90 %, a stope mutacije su 1 %, 2 %, 3 %, 5 %, 7 % i 10 %. Isto tako, kao što je prije navedeno, u obzir je uzeta i stopa dinamičke mutacije, s minimalnom stopom mutacije od 1 % i maksimalnom stopom mutacije od 11 %, uz 1-postotni prirast stope mutacije, te s 50 generacija za 1-postotnu ili manju promjenu vrijednosti troška. Kako bi se rezultati dinamičke stope mutacije usporedili s ostalim stopama mutacije, optimalna stopa mutacije dobivena analizom nije uzeta u obzir pri određivanju minimalne i maksimalne stope mutacije (1 % i 11 %).

Tablica 2. Parametri genetskog algoritma korišteni za hidrauličku optimizaciju

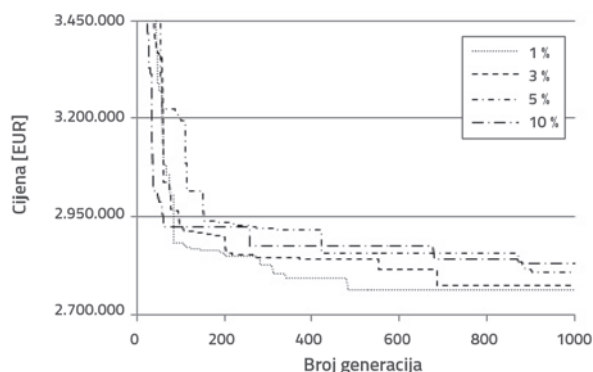
Broj generacija	1000
Kraj	Nakon ukupne populacije
Broj bitova	Prema pojedinačnim vrijednostima promjera i nagiba
Veličina populacije	60, 80, 100, 120, 140
Stopa elitizma	1 %, 3 %, 5 %, 10 %
Selekcija roditelja	Turnir
Stopa turnira	0,5; 0,75
Broj turnira	2
Metoda križanja	Uniformna, u jednoj točki, u dvije točke
Uniformna	Svaki bit za potomak1 ili potomak2 prema slučajnom broju
U jednoj točki	Prekid na slučajnom broju
U dvije točke	Prekid na dva slučajna broja
Stopa križanja	30 %, 50 %, 70 %, 90 %
Stopa mutacije	1 %, 2 %, 3 %, 5 %, 7 %, 10 %
Stopa dinamičke mutacije	Razlika u trošku susjednih monotoni generacija < 1 %

Nakon provedbe svih ispitanih kombinacija, može se zaključiti da bi optimalno rješenje za projekt bilo sljedeće: veličina populacije je 100 (slika 3.), stopa elitizma je 1 % (slika 4.), stopa turnira je 0,5 (slika 5.), kao metoda križanja koristi se algoritam u jednoj točki (slika 6.), stopa križanja je 50 % (slika 7.), a stopa mutacije je 7 % (slika 8.). Na slikama 3. do 8. prikazane su razlike između raznih parametara genetskog algoritma. Rezultati prikazani na tim slikama pokazuju da se kao optimalne vrijednosti dobivene pokusima mogu dobiti i drugi parametri genetskog algoritma a ne samo oni prikazani na pojedinačnim slikama. Na primjer, primjenom različitih vrijednosti za veličinu populacije (60, 80, 100, 120 i 140) (slika 3.), dobivene su optimalne vrijednosti za ostale parametre genetskog algoritma: stopa elitizma je 1 %,

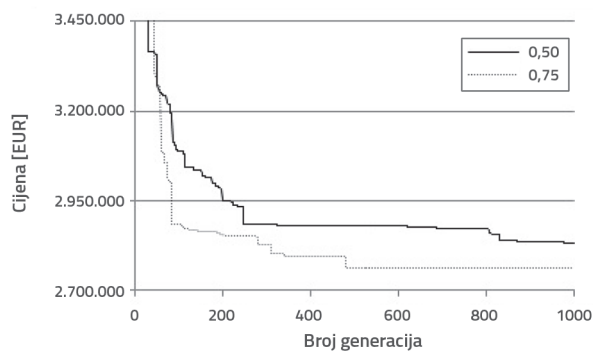
stopa turnira je 0,75, kao metoda križanja koristi se algoritam u jednoj točki, stopa križanja je 50 %, a stopa mutacije je 7 %.



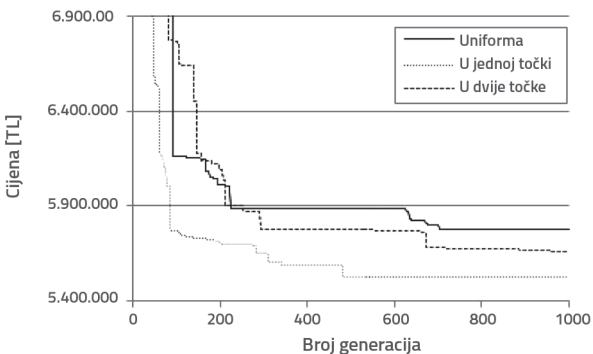
Slika 3. Usporedba veličina populacija



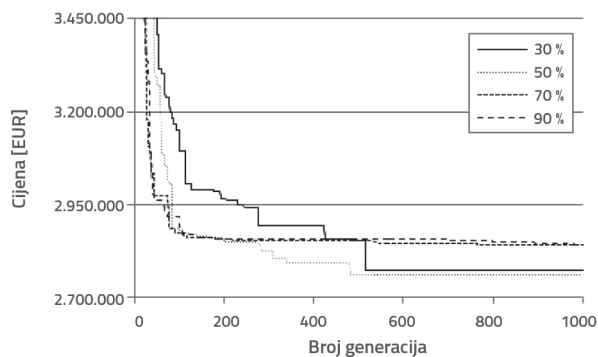
Slika 4. Usporedba stopa elitizma



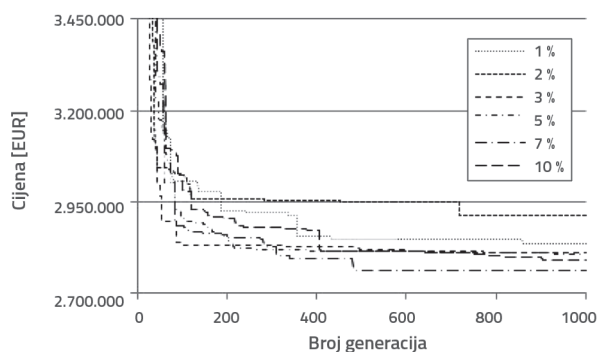
Slika 5. Usporedba stopa turnira



Slika 6. Usporedba metoda križanja

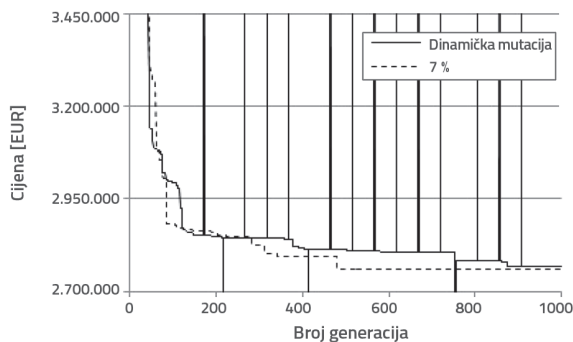


Slika 7. Usporedba stopa križanja



Slika 8. Usporedba stopa mutacija

Stopa dinamičke mutacije kombinira se sa stopom optimalne mutacije (7 %) na način kako prikazuje slika 9. Gornje linije na toj slici pokazuju da je stopa mutacije porasla za 1 %, a donje linije pokazuju da se stopa mutacije u toj točki smanjila za 1 %.



Slika 9. Usporedba stope konstantne mutacije i stope dinamičke mutacije

Iako je sedampostotna stopa mutacije nešto povoljnija od stope dinamičke mutacije, jasno je da je u tom slučaju potreban veći broj pokusa za iznalaženje stope optimalne mutacije. Kao što vidimo na slici 9, rezultati su prilično slični. Testirane su sve vrijednosti mutacije tj. 1 %, 2 %, 3 %, 5 %, 7 % i 10 % (jedno rješenje za šest pokusa) da bi se dobila optimalna mutacija od 7 %. S druge strane, kada je korištena dinamička mutacija, samo je jedan pokus mutacije bio dovoljan da bi se dobilo optimalno rješenje. Očito je dakle da je metoda dinamičke mutacije prikladnija od ispitivanja različitih vrijednosti mutacije.

6. Rezultati

Cijena dobivena hidrauličkom optimizacijom iznosi 2.762.534,00 EUR, a cijena originalnog projekta bez optimizacije iznosi 2.913.750,00 EUR. To pokazuje da je uvođenjem optimizacijskog postupka u hidraulički proračun postignuta ušteda od otprilike 5,5 %.

Pokusi s različitim genetskim algoritmima za projekt koji se obrađuje kao primjer pokazuju da su sljedeće vrijednosti pogodne za dotični projekt: veličina populacije je 100, stopa elitizma je 1 %, stopa turnira je 75 %, kao metoda križanja usvaja se algoritam u jednoj točki, stopa križanja je 50 %, a stopa mutacije je 7 %. U oba slučaja postignuti su slični rezultati. Iako je stopa mutacije od 7 % nešto bolja od rezultata dinamičke mutacije, jasno je kako bi trebalo obaviti veći broj pokusa da se dobije optimalna mutacija. Zbog toga se čini da je dinamička mutacija ipak prihvatljivija.

Kvantitativne vrijednosti dobivene hidrauličkom optimizacijom uspoređene su s originalnim vrijednostima kako je to prikazano u tablici 3. Ta tablica pokazuje da se vrijednosti promjera smanjuju. Maksimalni promjer je $\varnothing 1800$ s optimizacijom, dok taj promjer bez optimizacije iznosi $\varnothing 2000$ (za 2 km). Stupac s razlikama koji se nalazi na desnoj strani naknadno je dodan ovoj tablici. Vrijednosti s oznakom plus (+) znače da primjena tog promjera raste, a vrijednosti s oznakom minus (-) upućuju na manje korištenje dotičnog promjera u hidrauličkoj optimizaciji.

U originalnom se projektu navodi da ukupni iskopi iznose gotovo 85.300 m³, a nakon optimizacije se iskop smanjuje za 500 m³. Prema jediničnim cijenama za projekt može se zaključiti da se u okviru programa optimizacije najpovoljnije rješenje postiže smanjivanjem promjera. Drugim riječima, uštede postignute u dubini iskopa manje su od ušteda u promjeru. Osim toga, nema nikakve razlike u kotama u točki ispuštanja, što znači da je projekt primjenljiv.

Tablica 3. Usporedba rezultata s optimizacijom i bez optimizacije

Promjer [mm]	Dužina bez optimizacije [m]	Dužina s optimizacijom [m]	Razlika [m]
$\varnothing 500$	9,107	9,498	391
$\varnothing 600$	792	1,160	368
$\varnothing 700$	247	0	-247
$\varnothing 800$	1,502	1,013	-489
$\varnothing 1000$	827	126	-701
$\varnothing 1200$	303	451	148
$\varnothing 400$	160	730	570
$\varnothing 1600$	95	0	-95
$\varnothing 1800$	298	2,340	2,042
$\varnothing 2000$	1,987	0	-1,987
Ukupno	15,318	15,318	

7. Zaključak

Najbolji način utvrđivanje optimalne cijene projekata oborinske / sanitarne odvodnje je primjena optimizacijskog algoritma umjesto ispitivanja velikog broja alternativa kako bi se dobila optimalna cijena. Zbog navedenog je razvijen algoritam za optimizaciju hidrauličkog projekta sustava oborinske / sanitarne odvodnje primjenom genetskog algoritma. Dakle, za optimizaciju hidrauličkog projekta koristi se genetski algoritam kako bi se omogućilo postizanje najboljeg kromosoma i prenošenje njegovih gena u novu generaciju. Umjesto primjene dostupnih alata za ispitivanje raznih algoritama, razvijen je novi računalni program, čime je povećan stupanj fleksibilnosti.

U obzir su uzete sve potrebne karakteristike oborinsko-sanitarnog sustava odvodnje. Te karakteristike su između ostalog: visinski odnosi, dužine, protoci i točke ispusta, vrste cijevi, promjeri dopušteni za dotični projekt, dozvoljeni minimalni i maksimalni uzdužni nagibi, minimalne i maksimalne dubine iskopa i protoci za svaki promjer, podaci o revizijskim oknima, količine potrebne za ocjenu, troškovi za svaku stavku na projektu, te formula za određivanje brzine protoka koju najviše koriste nadležne vladine ustanove. Stoga se program razvijen primjenom tih parametara može koristiti na svim oborinsko-sanitarnim projektima odvodnje bez unošenja bilo kakvih promjena u algoritam.

Promjeri cijevi i uzdužni nagibi osnovni su ulazni podaci za algoritam koji je razvijen za hidrauličku optimizaciju. Te su vrijednosti definirane slučajnim odabirom. Kako bi se smanjilo vrijeme računanja, slučajne vrijednosti promjera cijevi i uzdužnog nagiba kontroliraju se prije samog proračuna da bi se tako eliminirale vrijednosti koje ne dovode do prikladnih rješenja. Optimalni promjeri cijevi i uzdužni nagibi dobiveni su primjenom formula za izračun troška, posebno prilagođenih za projekt. Razvijen program primijenjen je na stvarnom projektu za koji nije provedena optimizacija. Testirane su različite metode i vrijednosti parametara genetskog algoritma kao što su veličina populacije, usporedne vrijednosti algoritma za odabir turnira, stope elitizma, metode križanja, stope križanja te stope mutacije u tijeku optimizacijskog postupka.

Parametri genetskog algoritma su: veličina populacije (60, 80, 100, 120 i 140), stopa elitizma (1 %, 3 %, 5 % i 10 %), broj turnira (2), stopa turnira (0,5 i 0,75), algoritmi križanja (u jednoj točki,

u dvije točke, uniformni), stope križanja (30 %, 50 %, 70 % i 90 %) i stope mutacije (1 %, 2 %, 3 %, 5 %, 7 % i 10 %). Kako bi se smanjio broj testiranja (naročito za stope mutacije), te radi što bržega postizanja optimalne vrijednosti mutacije, u ovom se radu predlaže nova metoda pod nazivom "metoda dinamičke mutacije".

Dinamička mutacija primjenjena u ovom istraživanju uspoređuje se s konstantnom mutacijom te s linearno rastućom ili padajućom mutacijom, tj. s mutacijama koje se koriste u sličnim istraživanjima. Minimalne i maksimalne vrijednosti mutacije odabrane su kako bi poslužile kao kontrolni parametri za mutaciju. Tijekom proračuna za svaku generaciju, najprihvatljivija se vrijednost uspoređuje s prethodnom prihvatljivom vrijednošću troška. Ako promjena vrijednosti kod susjednih 50 generacija iznosi samo 1 % ili manje, tada se korištena stopa mutacije povećava za 1 %. Ako se vrijednost kod bilo koje generacije promijeni za više od 1 %, tada 50-generacijski kontrolni interval počinje od početka, a stopa mutacije se smanjuje za 1 %.

Po završetku postupka, za projekt su odabrani najpovoljniji parametri genetskog algoritma: 100 za veličinu populacije, 1 % za stopu elitizma, 0,75 za stopu turnira, algoritam u jednoj točki za metodu križanja, 50 % za stopu križanja, te 7 % za stopu mutacije. Osim toga, iz rezultata se može vidjeti djelotvornost dinamičke mutacije kojom se postižu najpovoljniji parametri genetskog algoritma i optimalno rješenje.

Rezultati ovog istraživanja pokazuju da je cijena dobivena novorazvijenim programom niža od izvorne vrijednosti projekta, pa je tako dokazana učinkovitost razvijenog algoritma. Jedna od prednosti tog algoritma sastoji se u činjenici da se on može koristiti u svim uvjetima projekta, bez ikakvih ograničenja i pretpostavki specifičnih za neki određeni projekt.

Kao rezultat istraživanja, može se navesti da je novi algoritam uspješan te da se može primijeniti na bilo kojem primjeru projekta.

Zahvale

U radu nema sukoba interesa. Zahvaljujemo uredniku i dvojici anonimnih revidenata na konstruktivnim komentarima koji su nam pomogli u poboljšanju kvalitete ovog rada.

LITERATURA

- [1] Cetin, T., Yurdusev, M.A.: Network Optimization of Urban Stormwater and Sewer Systems by Genetic Algorithms, *the Second International Conference on Water, Energy and the Environment*, 2013.
- [2] Weng, H.T., Liaw, S.L., Huang, W.C.: Establishing an Optimization Model for Sewer System Layout with Applied Genetic Algorithm, *Journal of Environmental Informatics*, 5 (2005) 1, pp. 26-35.
- [3] Weng, H.T., Liaw, S.L.: An Optimization Model for Urban Sewer System Hydraulic Design, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 30 (2007) 1, pp. 31-42, 2007, <https://doi.org/10.1080/102533839.2007.9671228>
- [4] Tekeli, S., Belkaya, H.: Computerized Layout Generation for Sanitary Sewers, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1986, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1986\)112:4\(500](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1986)112:4(500)

- [5] Moeini, R., Afshar, M.H.: Layout and size optimization of sanitary sewer network using intelligent ants, *Advances in Engineering Software*, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2012.05.003>
- [6] Haghghi, A.: Loop by Loop Cutting Algorithm to Generate Urban Drainage Systems Layout, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2012.
- [7] Diogo, A.F., Walters, G.A., Sousa, E.R.: Three-Dimensional Optimization of Urban Drainage Systems, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2000.
- [8] Siriwardene, N.R., Perera, B.J.C.: Selection of Genetic Algorithm Operators for Urban Drainage Model Parameter Optimisation, *Mathematical and Computer Modelling*, 44 (2006), pp. 415–429, <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.01.002>
- [9] Afshar, M.H.: Application of a Genetic Algorithm to Storm Sewer Network Optimization, *Sci. Iran.*, 13 (2006), pp. 234–244.
- [10] Pianese, D., Palumbo, A., Mucherino, C., Covelli, C.: A procedure For Optimal Sizing of Urban Drainage Networks, 2011.
- [11] Brand, N., Ostfeld, A.: Optimal Design of Regional Wastewater Pipelines and Treatment Plant Systems, *Water Environment Research*, 83 (2011), pp. 53–64, <https://doi.org/10.2175/106143010X12780288628219>
- [12] Afshar, M.H.: Rebirthing Genetic Algorithm for Storm Sewer Network Design, *Scientia Iranica A*, 19 (2012) 1, pp. 11–19, <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.12.005>
- [13] Haghghi, A., Bakhshipour, A.E.: Optimization of Sewer Networks Using an Adaptive Genetic Algorithm, *Water Resource Management*, 26 (2012), pp. 3441–3456, <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0084-3>
- [14] Cimorelli, L., Cozzolino, L., Covelli, C., Mucherino, C., Palumbo, A., Pianese, D.: Optimal Design of Rural Drainage Networks, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2012.
- [15] Ogidan, O., Giacomoni, M.: Sanitary Sewer Overflow Reduction Optimization Using Genetic Algorithm, *World Environmental and Water Resources Congress*, 2015, <https://doi.org/10.1061/9780784479162.218>
- [16] Zimmer, A., Schmidt, A., Ostfeld, A., Minsker, B.: Evolutionary algorithm enhancement for model predictive control and real-time decision support, *Environmental Modeling & Software*, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.03.005>
- [17] Afshar, M.H., Afshar, A., Mariño, M.A., Darbandi, A.A.S.: Hydrograph-based storm sewer design optimization by genetic algorithm, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2006, <https://doi.org/10.1139/I05-121>
- [18] Beraud, B., Mourad, M., Soyeux, E., Lemoine, C., Lovera, M.: Optimisation of sewer networks hydraulic behaviour during wet weather: coupling genetic algorithms with two sewer networks modelling tools, *NovaTech*, 2010.
- [19] Guo, Y., Walters, G., Khu, S.T., Keedwell, E.: Optimal Design of Sewer Networks Using Hybrid Cellular Automata and Genetic Algorithm, *IWA Publishing*, 2006.
- [20] Pan, T.C., Kao, J.J.: GA-QP Model to Optimize Sewer System Design, *Journal of Environmental Engineering*, 135 (2009), pp. 17–24, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:1\(17\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:1(17))
- [21] Rohani, M., Afshar, M.A.: GA–GHCA model for the optimal design of pumped sewer networks, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42 (2015) 1, pp. 1–12, <https://doi.org/10.1139/cjce-2014-0187>
- [22] Liang, L.Y., Thompson, R.G., Young, D.M.: Optimising the design of sewer networks using genetic algorithms and tabu search, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2004, <https://doi.org/10.1108/09699980410527849>
- [23] Muslu, Y.: Water Supply and Environmental Health with Solved Problems, 2002.
- [24] ASCE Task Force on Friction Factors in Open Channels, Friction Factors in Open Channels, *J. Hydr. Div.*, 89 (1963) 2, pp. 97–143.
- [25] Liou, C.P.: Limitations and Proper Use of the Hazen-Williams Equation, *J. Hydr. Engrg.*, 124 (1998) 9, pp. 951–954.
- [26] Afshar, M.H.: Partially Constrained Ant Colony Optimization Algorithms for the Solution of Constrained Optimization Problems: Application to Storm Water Network Design, *Advances in Water Resources*, 30 (2007), pp. 954–965, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.08.004>
- [27] Swamee, P.K., Critical Slope Equations for Open Channels, *ISH J. Hydraulic Eng* 2002.
- [28] Cetin, T., Yurdusev, M.A.: The Comparison of Velocity Formulas Used in Stormwater And Sewage Design, *CBU Journal of Science*, 2016.
- [29] Cetin, T.: Optimization of Urban Stormwater and Sewage Systems, *Ph.D. Thesis*, 2014.
- [30] Guo, Y., Walters, G.A., Khu, S.T., Keedwell, E.: A novel cellular automata based approach to storm sewer design, *Engineering Optimization*, 2007, <https://doi.org/10.1080/03052150601128261>
- [31] Izquierdo, J., Montalvo, I., Pérez, R., Fuertes, V.S.: Design optimization of wastewater collection networks by PSO, *Computers and Mathematics with Applications*, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2008.02.007>
- [32] Afshar, M.H.: A parameter free Continuous Ant Colony Optimization Algorithm for the optimal design of storm sewer networks: Constrained and unconstrained approach, *Advances in Engineering Software*, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2009.09.009>
- [33] Yeh, S.F., Chu, C.W., Chang, Y.J., Lin, M.D.: Applying tabu search and simulated annealing to the optimal design of sewer networks, *Engineering Optimization*, 2010.
- [34] Swamee, P.K., Sharma, A.K.: Optimal Design of a Sewer Line Using Linear Programming, *Appl. Math. Modelling*, 2012.
- [35] Goldberg, D.E., Deb, K.: A Comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms, in: G.J. Rawlins (Ed.), *Foundations of Genetic Algorithms*, Morgan Kaufman Publishers, San Mateo, California, pp. 69–93, 1991, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-050684-5.50008-2>
- [36] Haupt, R.L., Haupt, S.E.: Practical Genetic Algorithms, Second Edition, *Wiley-Interscience*, 2004.
- [37] Mitchel, M.: An Introduction to Genetic Algorithms, Fifth Edition, *MIT Press*, 1999.
- [38] Guo, Y., Walters, G., Savic, D.: Optimal design of storm sewer networks: Past, Present and Future, *11th International Conference on Urban Drainage*, 2008.