

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Robič, G., 2013. Hidravlično modeliranje obratovanja črpalk na cevovodnih omrežjih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Steinman, F., somentor Kozelj, D.): 70 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Robič, G., 2013. Hidravlično modeliranje obratovanja črpalk na cevovodnih omrežjih. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Steinman, F., co-supervisor Kozelj, D.): 70 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**PRVOSTOPENJSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM VODARSTVO IN
OKOLJSKO INŽENIRSTVO (UN)**

Kandidat:

Diplomska naloga št.: 9/B-VOI

Graduation thesis No.: 9/B-VOI

Mentor:

Predsednik komisije:

(. dr.)

Somentor:

Ljubljana, 11. 09. 2013

Ta stran je namenoma prazna.

IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani **Gregor Robič** izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom
»**Hidravlično modeliranje obratovanja črpalk na cevovodnih omrežjih**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 26. 8. 2013

Gregor Robič

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN POVZETEK

UDK: 004.414.23:628.14(497.12)(043.2)
Avtor: Gregor Robič
Mentor: prof. dr. Franc Steinman
Somentor: asist. Daniel Kozelj
Naslov: Hidravlično modeliranje obratovanja črpalk na cevovodnih omrežjih
Tip dokumenta: diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 70 str., 11 pregl., 53 sl., 38 en.
Ključne besede: obratovanje črpalk, cevovodno omrežje, hidravlično modeliranje, EPANet, GANetXL, optimizacija, stroški črpanja

Povzetek

Cevovodna omrežja skrbijo za distribucijo vode do porabnikov. Črpalni sistem v obliki mehanskega dela dodaja potrebno energijo za transport vode po omrežju; črpalke porabljajo električno energijo, ki jo spreminjajo v mehansko delo. Količina porabljene električne energije in s tem povezani stroški so veliki, zato lahko z izboljšanjem delovanja črpalnega sistema v določenem obdobju privarčujemo vsoto, ki ni zanemarljiva. Na optimiziranje delovanja črpalnega sistema vpliva več dejavnikov (hidravlične zakonitosti, vzorec porabe, spreminjanje tarife električne energije), poleg tega pa moramo tehtati med nasprotujočimi si cilji (stroški porabljene električne energije v enem dnevu ali dnevni obratovalni stroški ter število vklopov in izklopov črpalk in z njimi povezani vzdrževalni stroški). Glede na te kriterije obstaja več optimalnih rešitev, izmed katerih izberemo tisto, ki je za določeni problem najboljša.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 004.414.23:628.14(497.12)(043.2)
Author: Gregor Robič
Supervisor: prof. Franc Steinman, Ph.D.
Cosupervisor: assist. Daniel Kozelj
Title: Hydraulic modeling of pump systems in water distribution networks
Document type: Graduation thesis – University studies
Scope and tools: 70 p., 11 tabl., 53 fig., 38 eq.
Keywords: pump systems, water distribution networks, hydraulic modeling, EPANet, GANetXL, optimization, pumping cost

Abstract

Water distribution networks provide water supply to consumers. Pumping system adds mechanical work, thus providing sufficient amount of energy for water distribution throughout network. Pump's mechanical work is made by consuming electrical power. Because consumption of electricity and costs of consumed energy are high improvements made on operation of pumping system can lead to non negligible savings. When optimising pump system's operation different factors have to be taken into account (hydraulic laws, consumption pattern, changes of tariff of electricity) while trade off between energy consumption costs at one hand and number of pump switches (and thus related pump maintenance costs) at the other hand is always present. Following this criteria several solutions exist which create solution space. According to these and other requirements, specific to a problem, one of possible solutions is chosen.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Francu Steinmanu in somentorju asist. Danielu Kozelju za vso pomoč in navodila pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi družini in Mateji za podporo v času pisanja diplomske naloge.

KAZALO

IZJAVA O AVTORSTVU	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN POVZETEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD.....	1
2 PREGLED HIDRAVLIČNIH ZAKONITOSTI	2
2.1 Cevovodna omrežja	2
2.2 Osnove hidravlike vodovodov.....	3
2.2.1 Kontinuitetna enačba	3
2.2.2 Energijska enačba.....	3
2.2.3 Energijske izgube.....	4
2.3 Osnove hidravlike črpalke in vodohrana	8
2.3.1 Črpalka in črpalna krivulja.....	9
2.3.2 Krivulja sistema in točka obratovanja črpalke.....	10
2.3.3 Črpalka s spremenljivo hitrostjo	10
2.3.4 Izkoristek črpalke	11
2.3.5 Sistem več črpalk	12
2.3.6 Rezervoar in vodohran	13
2.3.7 Delovanje vodohrana	13
2.3.8 Nihanje porabe vode	14
2.4 Program EPANet 2.0	15
2.4.1 Razvoj in opis programa EPANet 2.0	15
2.4.2 Uporaba programa EPANet 2.0.....	18
2.5 Genetski algoritmi.....	19
2.5.1 Sistemi za podporo pri odločanju	21
2.6 Program GANetXL.....	21
2.6.1 Opis programa GANetXL	21
2.6.2 Uporaba programa GANetXL	23
2.7 Pretvorba enot in umerjanje modela.....	26
3 OPTIMIZACIJA STROŠKOV ČRPANJA NA HIPOTETIČNEM PRIMERU	27
3.1 Opis primera	27

3.2 Priprava in izpis podatkov	29
3.3 Umerjanje.....	30
3.4 Usklajevanje koeficientov hrapavosti po spremembi merskega sistema	31
3.5 Optimizacija stroškov črpanja	36
3.5.1 Stroški električne energije	36
3.5.2 Parametri optimizacije z GANetXL.....	36
4 REZULTATI	39
4.1 Rezultati optimizacijskih računov	39
4.2 Končni optimizacijski računi	40
4.3 Analiza rezultatov	40
5 ZAKLJUČEK.....	44
VIRI.....	45

KAZALO SLIK

Slika 1: Vejičasti sistem vodovodnega omrežja	2
Slika 2: Bilanca energije	5
Slika 3: Tok v cevi	6
Slika 4: Centrifugalna črpalka.....	9
Slika 5: Črpalna krivulja.....	10
Slika 6: Točka obratovanja	10
Slika 7: Izkoristek črpalke.....	11
Slika 8: Vgradnja črpalk	12
Slika 9: Vzoredna vgradnja dveh črpalk	12
Slika 10: Iztok iz vodohrana	13
Slika 11: Običajni vodohran	14
Slika 12: Vpliv velikosti naselja na dnevno nihanje porabe.....	14
Slika 13: Vzorec dnevne porabe z dvema viškoma	15
Slika 14: Enotočkovna črpalna krivulja	17
Slika 15: Gumbi orodne vrstice za vstavljanje elementov	18
Slika 16: EPANet 2.0 grafični vmesnik	19
Slika 17: Podatki o elementu.....	19
Slika 18: Poenostavljen prikaz evolucijskega algoritma.....	20
Slika 19: Pareto fronta	23
Slika 20: Orodna vrstica	24
Slika 21: Vrsta optimizacije glede na število kriterijev.....	25
Slika 22: Definiranje kriterijev optimizacije.....	25
Slika 23: Pretok v sistemu	28
Slika 24: Tabelarni izpis podatkov	29
Slika 25: Tlak v vodohranu	31
Slika 26: Vtok v vodohran	31
Slika 27: Korelacija srednjih vrednosti tlakov.....	32
Slika 28: Korelacija srednjih vrednosti tlakov po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti	32
Slika 29: Primerjava srednjih vrednosti tlakov	32
Slika 30: Primerjava srednjih vrednosti tlakov po prilagajanju koeficientov hrapavosti	32

Slika 31: Korelacija srednjih vrednosti pretokov	32
Slika 32: Korelacija srednjih vrednosti pretokov po prilagajanju koeficientov hrapavosti	32
Slika 33: Tlak v vozlišču 13 po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti	33
Slika 34: Tlak v vozlišču 5 po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti	33
Slika 35: Vtok v sistem (pretok) po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti	34
Slika 36: Pretok v cevi 9 po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti	34
Slika 37: Gladina v vodohranu po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti.....	34
Slika 38: Pretok vodohrana po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti	34
Slika 39: Tlak v vozlišču 13 po z optimizacijo določeni hidravlični hrapavosti.....	35
Slika 40: Tlak v vozlišču 5 po z optimizacijo določeni hidravlični hrapavosti.....	35
Slika 41: Vtok v sistem (pretok) po z optimizacijo določeni hidravlični hrapavosti.....	35
Slika 42: Pretok v cevi 9 po z optimizacijo določeni hidravlični hrapavosti.....	35
Slika 43: Gladina v vodohranu po z optimizacijo določeni hidravlični hrapavosti	35
Slika 44: Pretok vodohrana po z optimizacijo določeni hidravlični hrapavosti.....	35
Slika 45: Pareto fronte izbranih optimizacijskih računov.....	37
Slika 46: Izbor skoraj optimalnih rešitev	39
Slika 47: Končni optimizacijski računi.....	40
Slika 48: Graf porabe in gladine v vodohranu (2 preklopa črpalk)	41
Slika 49: Prikaz rezultatov in kršenja omejitev (2 preklopa črpalk)	41
Slika 50: Prikaz vklopljenih črpalk (2 preklopa črpalk).....	42
Slika 51: Urni stroški in poraba energije (2 preklopa črpalk).....	42
Slika 52: Tabela odločitvenih spremenljivk in izhodnih podatkov – izpis v programu GANetXL (2 preklopa črpalk)	42
Slika 53: Tabela odločitvenih spremenljivk in izhodnih podatkov – izpis v programu GANetXL (2 preklopa črpalk) (nadaljevanje).....	43

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Izražanje koeficienta trenja λ	6
Preglednica 2: Vrednosti koeficienta hrapavosti C' po Agroskinu.....	8
Preglednica 3: Koeficienti hrapavosti za nove cevi.....	16
Preglednica 4: Tehnične hrapavosti, pripadajoče različnim koeficientom hrapavosti	30
Preglednica 5: Z optimizacijo določene hidravlične hrapavosti	36
Preglednica 6: Podražitve tarif dobaviteljev električne energije	36
Preglednica 7: Optimizacijski parametri	37
Preglednica 8: Izbrani optimizacijski parametri.....	38
Preglednica 9: Rezultati optimizacijskih računov	39
Preglednica 10: Končni optimizacijski parametri pri izbranem izhodiščnem številu.....	40
Preglednica 11: Optimalne rešitve	41

1 UVOD

Namen cevovodnih omrežij je distribucija vode do porabnikov. Omrežje mora biti zasnovano tako, da čim bolje služi namenu tako s tehničnega vidika kot tudi z vidika gospodarnosti in ekonomičnosti. Bistvene zahteve za cevovodna omrežja so:

- 1 dovod zadostne količine vode pod ustreznim pritiskom in ustrezne kvalitete v vsako točko omrežja in do porabnikov,
- 2 pri nobeni potrošnji ne sme hitrost vode preseči tehnično dopustne meje,
- 3 skupaj z ostalimi vodooskrbnimi objekti in elementi mora zadostiti kriterijem varčnosti in čim nižjih obratovalnih stroškov

Cevovodna omrežja sestavlja več elementov z različnimi funkcijami. Za zadostno količino in pretok vode običajno potrebujemo črpalni sistem, ki k razpoložljivemu težnostnemu potencialu dodaja zadostno količino energije za distribucijo vode po omrežju. Z vključitvijo črpalnega sistema v omrežje se povišanju stroškov ne moremo izogniti. Ker so lahko ti stroški obsežni, je smiselno črpalni sistem tako zasnovati, da bo delovanje čim bolj gospodarno. Ena od takih rešitev je uporaba vodohrana, s katerim lahko znižamo stroške črpanja. Cilj te diplomske naloge je spoznati in uporabiti računalniška orodja tako, da na primeru cevovodnega omrežja čim bolj izkoristimo črpalni sistem in vodohran ter zadostimo potrebam porabnikov na čim bolj gospodaren način. Uporabljeni računalniški orodja sta omogočila hidravlično modeliranje in optimizacijo delovanja črpalk v danem primeru.

V poglavju 2 so zbrane nekatere hidravlične zakonitosti, ki so bile upoštevane pri izračunih, ter opis delovanja uporabljenih programov. Za izdelavo te diplomske naloge sta bili ključni naslednji programski orodji: EPANet 2.0 in GANetXL. Prvo je služilo predvsem kot računski vmesnik s hidravličnim modelom, z drugim pa so bili izvedeni optimizacijski računi.

Poglavje 3 opiše izbrani primer sistema in način, kako je bil sistem opisan s hidravličnim modelom. Nato obravnava umerjanje hidravličnega modela in določevanje tehnične hrapavosti ter parametrov za optimizacijo stroškov črpanja.

Rezultati optimizacijskih računov in ugotovitve so podani v poglavju 4. Zaradi prostorske obsežnosti slik, ki prikazujejo nekatere rezultate, so preostale slike, pripadajoče poglavju 4, podane v prilogah.

Zadnja tri poglavja vsebujejo zaključek, kjer so strnjeno zbrane ugotovitve in nekatera zanimiva področja nadgraditve diplomske naloge, uporabljene vire ter priloge k poglavjem od 2 do 4.

2 PREGLED HIDRAVLIČNIH ZAKONITOSTI

2.1 Cevovodna omrežja

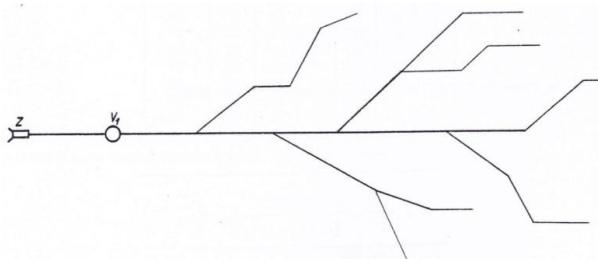
S cevovodnimi sistemi lahko oskrbujemo različne uporabnike. Z vodovodnimi omrežji oskrbujemo naselja s pitno vodo, s tehnološkimi omrežji industrijo, z namakalnimi sistemi kmetijstvo, itd. V nadaljevanju bomo obravnavali vodovodne sisteme.

Na zasnovo vodovodnega omrežja vplivajo krajevno oblikovanje terena, značilnosti porabe in razporeditev porabnikov ter vodnih virov, umetne in naravne ovire (železnice, vodotoki, priključeni objekti,...) in ostalo. Funkcionalnost in vzdrževanje omrežja zahtevata sistematičnost in urejenost pri vzpostavitvi in obratovanju sistema. V ta namen pri vodovodnem omrežju ločimo [1]:

- 1 glavni vodovod, katerega namen je dovod vode v naselje,
- 2 napajalni vodovod, ki odvaja vodo iz glavnega vodovoda v posamezne dele naselja,
- 3 razdelilni vodovod, ki skrbi za distribucijo vode do končnih porabnikov.

V uporabi so trije značilni sistemi vodovodnih omrežij, ki se med seboj ločijo glede na razporeditev in povezavo zgoraj naštetih vodovodov: vejičasti sistem, mrežasti sistem, krožni sistem.

Vejičasti sistem se uporablja v vaseh, manjših naseljih ali industrijah, kjer so vodovodi ali tehnološka omrežja razporejeni do posameznih, med seboj odmaknjenih, porabnikov. Značilnost tega sistema je, da med posameznimi odcepi napajalnih in razdelilnih vodovodov ni povezave. To je izrazita pomanjkljivost v primeru okvar na posamezni veji, saj so prizadeti vsi porabniki od točke okvare dalje. Poleg tega ni zagotovljenega stalnega kroženja vode, temveč predvsem ponoči zastaja, zato je treba tak sistem večkrat izplakovati.



Slika 1: Vejičasti sistem vodovodnega omrežja
(Sketelj, 1957, str. 10)

Mrežasti sistem se je razvil iz vejičastega sistema s povezavo napajalnih vodovodov z razdelilnimi vodovodi. S tem pri kritični porabi sodeluje celotno omrežje, kar razbremeni posamezne vodovode. V primeru okvare se lahko zapre posamezne dele omrežja, voda pa do porabnikov doteka z drugih koncev omrežja. Ker voda tudi stalno kroži, je tak sistem omrežja bistveno primernejši v vsakem večjem naselju. Krožni sistem je podoben

mrežastemu sistemu, le da glavni vodovod tvori povratno zanko. To pripomore k izboljšanju hidravličnih pogojev (krožni sistem lažje sledi večjim spremembam potrošnje in povečanim obremenitvam). Sliki mrežastega in krožnega sistema sta podani v prilogah A 1 in A 2.

2.2 Osnove hidravlike vodovodov

Matematični opis gibanja tekočin (vode) je za praktične primere običajno preveč zahteven in nerešljiv brez poenostavitev, zato z zavedanjem, da naredimo manjše napake¹, vpeljemo določene predpostavke: voda je nestisljiva tekočina, voda nima površinske napetosti, tok je stacionaren (hitrost in tlak se s časom ne spreminjata),...

Za hidravliko vodovodov je značilno, da je tok v ceveh pod tlakom in voda zapolnjuje celoten prečni prerez cevi, torej tok nima proste gladine. Praviloma je tak tok turbulenten in nestacionaren [2].

2.2.1 Kontinuitetna enačba

Kontinuitetna enačba (zakon o ohranitvi mase) temelji na tem, da sta dotok in iztok na površini kontrolnega volumna enaka, če je masa tekočine v tem volumnu nespremenjena. Če upoštevamo predpostavki o nestisljivosti vode ($\rho = const.$) in o stacionarnem toku ($\frac{\partial v}{\partial t} = 0$), velja, da je pretok konstanten [2]:

$$\frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \rightarrow Q = const. \quad (1)$$

$$Q = vA \quad (2)$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = \dots = v_i A_i \quad (3)$$

v je hitrost, A je prečni prerez cevi, s pa smer naravne koordinate ali v našem primeru smer osi cevi. Tok, pri katerem prevladuje hitrost le v eni smeri, imenujemo enodimenzijski tok. Z uvedbo naravne koordinate lahko tok po cevi obravnavamo kot enodimenzijski tok. Uporaba enačb (2) in (3) je običajna pri problemih hidravlike vodovodov.

2.2.2 Energijska enačba

Po zakonu o ohranitvi energije velja, da se celotna energija sistema ne spremeni, če mu nista dodani ali odvzeti toplota in energija zaradi dela iz okolice. V hidrotehnični praksi spremembe energije zaradi dodane ali odvzete toplote in mehanskega dela niso običajne, zato se za enodimenzijski tok ob upoštevanju predpostavke o stacionarnem toku uporablja t.i. energijska enačba [2]:

¹ Pri natančnosti hidravličnih izračunih se upošteva računsko negotovost $\pm 2-5$ %, zato so določene poenostavitve upravičene, saj prinesejo dosti manjšo napako.

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma \Delta E \quad (4)$$

ali krajše:

$$E_1 = E_2 + \Sigma \Delta E \quad (5)$$

V prerezih 1 in 2 z merjenjem prispevkov tlaka ($\frac{p}{\rho g}$), geodetske višine (z) in hitrosti ($\frac{v^2}{2g}$) določimo energijo toka. Ker se skupni prispevek teh členov od prereza 1 do prereza 2 zmanjša, moramo upoštevati tudi preostali del energije ($\Sigma \Delta E$), ki je v nadaljevanju opisan kot energijske izgube.

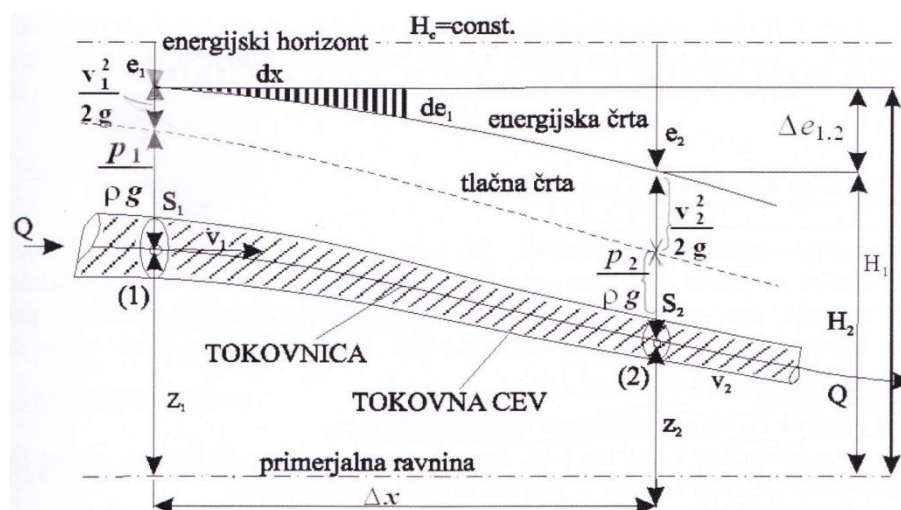
2.2.3 Energijske izgube

Celotna energija sistema se po zakonu o ohranitvi energije ohranja ne glede na pretvorbe iz ene oblike energije v drugo. Toda določenih oblik energije v hidrotehniko ne moremo izkoristiti, zato energijo delimo na povratni in nepovratni del. Povratni del predstavljajo energija v obliki tlaka, potencialna energija in kinetična energija, nepovratni del pa na primer notranja energija. Ker nepovratnega dela energije ne moremo več izkoristiti, je v hidrotehničnem smislu izgubljen, zato se te oblike energije imenujejo tudi »energijske izgube«. [2]

Pri pojmovanju vode kot idealne tekočine v njej nastopajo samo tlačne napetosti, strižne in natezne² napetosti pa zanemarimo. To pomeni, da zanemarimo tudi energijske izgube. Če pa vodo obravnavamo kot realno tekočino, t.j. upoštevamo viskoznost vode, katere posledica so strižne napetosti in notranje trenje, energijskih izgub ne zanemarimo (v energijski enačbi so predstavljene s členom $\Sigma \Delta E$).

Na sliki 1 je prikazano označevanje energijskih členov na primeru toka v cevi. Povratni del energije je prikazan s členi od primerjalne ravnine do energijske črte, nepovratni del pa se nahaja med energijsko črto in energijskim horizontom. Črti primerjalne ravnine in energijskega horizonta sta vzdolž toka med prerezoma 1 in 2 vzporedni, torej se je energija v tem delu sistema ohranila. Energijska črta pa je od prereza 1 do prereza 2 padajoča, torej se vzdolž toka povratni del energije manjša, nepovratni pa večja – energijske izgube se večajo.

² Natezne napetosti je smiselno upoštevati le pri kapilarnem dvigu, drugje pa so povsem zanemarljive.



Slika 2: Bilanca energije (Steinman, 2010, str. 23)

Ločimo dve vrsti energijskih izgub:

- 1 trenjske ali linijske izgube, ki nastanejo zaradi premagovanja trenja vzdolž toka,
- 2 lokalne izgube, ki nastanejo zaradi lokalnih motenj (vtok, iztok, razširitve, zožitve, kolena,...).

Prispevek lokalne izgube označimo z:

$$\Delta E_{lok} = \xi_{lok} \frac{v^2}{2g}, \quad (6)$$

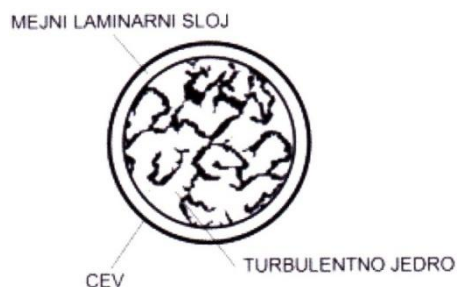
vendar pri daljših vodovodih in večjih vodovodnih omrežjih večinski delež energijskih izgub prinesejo linijske izgube, zato lahko v okviru hidravlične natančnosti lokalne izgube zanemarimo.

Velikost trenjskih ali linijskih izgub pa je povezana z režimom toka. Za laminarni režim toka je značilno, da se sloji tekočine med seboj ne mešajo, notranje trenje pa nastaja na stičnih ploskvah slojev, ki se gibljejo z različnimi hitrostmi. Energijske izgube so v laminarnem režimu toka linearno odvisne od hitrosti gibanja tekočine. Toda laminarni režim toka je v naravi zelo redek pojav, ki se izrazi le pri majhnih hitrostih, na primer pri toku podtalnice. Navadno pa se pri toku vode v praksi izrazi turbulentni režim, za katerega je značilno mešanje slojev tekočine in posledično povečano trenje zaradi dodatnih strižnih sil, zato energijske izgube naraščajo s kvadratom hitrosti. Turbulentni režim toka je značilen za tok v vodovodnih omrežjih, kjer se ob steni cevi ohrani tanek mejni laminarni sloj, preostali del pa zapolnjuje turbulentno jedro. Po opazovanjih Reynoldsa režim toka definiramo s t.i. Reynoldsovim številom:

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (7)$$

kjer je v hitrost, d premer cevi in ν kinematični koeficient viskoznosti. Če je $Re < 2300$, je režim toka laminaren, če pa je $Re > 2300$, je režim turbulenten. Med obema režimoma

obstaja prehodno območje ali prehodni režim, ki je podoben turbulentnemu, vendar s slabše izraženimi karakteristikami [2].



Slika 3: Tok v cevi (Steinman, 2010, str. 26)

Prispevek linijske izgube za krožne cevi zapišemo z enačbo Darcy-Weisbach:

$$\Delta E_{tr} = \lambda \frac{L v^2}{d 2g}, \quad (8)$$

L je dolžina cevi, d premer cevi, v hitrost toka in λ t.i. Darcy-Weisbachov koeficient trenja. Brezdimenzijski koeficient trenja λ je v splošnem funkcija Reynoldsovega števila (Re) in relativne hrapavosti³ cevi ($\frac{\varepsilon}{d}$) ter se spreminja z režimom toka. Povezava med koeficientom trenja, Reynoldsovim številom in relativno hrapavostjo je podana z enačbo Colebrook-White [3]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -0,86 \ln\left(\frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}}\right) \quad (9)$$

Iz te enačbe λ ni mogoče direktno izraziti, zato si pomagamo z grafično različico enačbe, to je Moodyjev diagram (glej prilogo A 3). Razdelimo ga lahko na štiri območja, glede na katera se λ različno izraža. Na abscisi so v logaritmičnem merilu nanešena Reynoldsova števila, na ordinati pa relativna hrapavost. Koeficient trenja λ glede na režim toka in relativno hrapavost preprosto odčitamo. Kot je razvidno z diagrama, so krivulje v območju hidravlično hrapavih cevi vodoravne, torej v tem območju koeficient trenja ni odvisen od Reynoldsovega števila, pač pa le od relativne hrapavosti. Bolj kot je cev gladka (zmanjševanje relativne hrapavosti), bolj je koeficient trenja odvisen od Reynoldsovega števila. Pri hidravlično gladkih ceveh relativna hrapavost nima več vpliva, saj je $\frac{\varepsilon}{d} = 0$. V laminarnem režimu je koeficient trenja prav tako odvisen le od Reynoldsovega števila. Izražanje koeficienta λ je za posamezno območje prikazano v preglednici 1.

Preglednica 1: Izražanje koeficienta trenja λ

Območje	Koeficient λ
Območje laminarnega režima toka	$\lambda = \frac{64}{Re}$
Prehodno območje (s karakteristikami turbulentnega režima)	$\lambda = f\left(Re, \frac{\varepsilon}{d}\right)$
Območje turbulentnega režima toka (hidravlično hrapavih cevi)	$\lambda = f\left(\frac{\varepsilon}{d}\right)$
Krivulja hidravlično gladkih cevi	$\lambda = f(Re)$

³ ε je višina hrap, d je premer cevi

Tehnična hrapavost (ε) predstavlja višino hrap na ostenju cevi in je lastnost cevi, odvisna od materiala in načina izdelave cevi in načina stikovanja. Za posamezne materiale jo podobno kot koeficiente hrapavosti (na primer Hazen-Williamsov koeficient hrapavosti) običajno odčitamo iz tabel.

Obratovalno (hidravlično) hrapavost določimo iz meritev tlakov na sistemu. Določena je torej posredno in jo razberemo iz obratovalnih pogojev (višji tlaki nakazujejo nižje energijske izgube - nižjo hrapavost in obratno).

Računska ali teoretična hrapavost je določena po računskih postopkih (na primer reševanje enačbe Colebrook-White).

Poleg enačbe Darcy-Weisbach (8), ki je najbolj točna in s katero se ponavadi računa linijske izgube v zaprtih sistemih (na primer vodovodno omrežje), so za račun linijskih izgub v hidravlično hrapavem območju toka⁴ v uporabi tudi druge enačbe [2]. Za odprte sisteme je uveljavljena de Chezyjeva enačba:

$$v = C\sqrt{RI} \quad (10)$$

ali Manningova izpeljanka:

$$v = \frac{1}{n_G} R^{2/3} I^{1/2}, \quad (11)$$

pri tem je C de Chezyjev koeficient trenja, n_G pa Manningov koeficient hrapavosti, ki se glede na C določa po empirični enačbi:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n_G} \quad (12)$$

R je hidravlični radij in I hidravlični padec. Manningov koeficient hrapavosti (n_G) in v enačbi (15) predstavljeni Hazen-Williamsov koeficient hrapavosti (C_{HW}) tako kot tehnično hrapavost cevi (ε) pridobimo iz tabel. Manningov koeficient hrapavosti in Darcy-Weisbachov koeficient trenja sta v naslednji zvezi (d je premer cevi, podan v [m]):

$$\lambda = 124,6 \frac{n_G^2}{d^{1/3}} \quad (13)$$

V ameriški literaturi je v uporabi enačba Hazen-Williams s koeficientom Hazen-Williams (C_{HW}):

$$v = 1,318 C_{HW} R^{0,63} I^{0,54}, \quad (14)$$

v kateri so uporabljene enote [ft] za hidravlični radij in [ft/s] za hitrost. Koeficient C_{HW} je podan kot:

$$C_{HW} = \frac{1}{\lambda}, \quad (15)$$

Latišenko in Lobačev sta enačbo (14) prilagodila za računanje z metričnimi enotami (hidravlični radij v [m] in hitrost v [m/s]) [1]:

⁴ Povezava parametrov različnih enačb je možna le v hidravlično hrapavem območju toka, kjer je vpliv viskoznosti zanemarljiv [2].

$$v = 0,8494 C_{HW} R^{0,63} I^{0,54}, \quad (16)$$

zveza med n_G in C_{HW} pa je:

$$n_G = 1,017 \frac{d^{0,0463}}{C_{HW}^{0,926}} \quad (17)$$

Agroskin podaja še enostavnejšo obliko enačbe Hazen-Williams, prirejeno za metrični sistem:

$$v = C' R^{0,63} I^{0,54}, \quad (18)$$

C' je odvisen od premera cevi in trajanja uporabe, saj tako kot C_{HW} upošteva zmanjšanje prepustnosti cevi zaradi oblog. Nekaj vrednosti tega koeficienta je podanih v preglednici 2.

Preglednica 2: Vrednosti koeficienta hrapavosti C' po Agroskinu (Sketelj, 1957, str. 8)

Premer [mm]	Število let uporabe cevi						
	0	5	10	20	30	40	50
100	110	100	90	75	63	54	46
200	110	100	92	78	70	62	55
300	110	101	94	81	73	65	59
400	110	101	94	83	74	67	61
600	110	101	95	85	75	68	63
750	110	101	95	85	76	70	64
900	110	101	95	85	76	70	64
1000	110	101	95	85	76	70	65
1500	110	101	95	85	76	70	65

Za določevanje linijskih izgub je enačba Darcy-Weisbach najbolj točna, saj trenjske izgube upošteva s trenjskim koeficientom λ in velja za vsa območja režima toka v Moodyjevem diagramu. Ostale naštetе enačbe (de Chezy, Manning, Hazen-Williams) pa so osnovane na de Chezyjevem koeficientu C in so empirične narave ter veljajo le v hidravlično hrapavem območju toka [2]. Neposredne zveze med trenjskim koeficientom in koeficientom hrapavosti po Hazen-Williamsu ni.

2.3 Osnove hidravlike črpalke in vodohrana

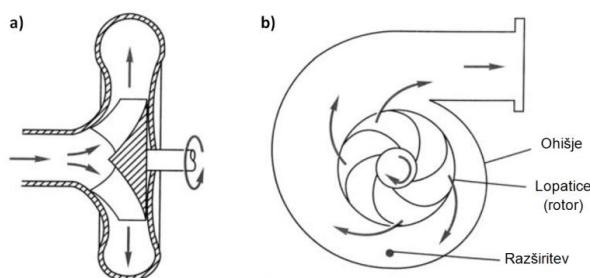
V vodovodno omrežje moramo za pogon vode po ceveh dovajati ustrezno količino energije. Z ozirom na energijske izgube to pomeni, da mora biti energijska črta dovolj visoko postavljena ali po potrebi vmes dvignjena, da od prereza A do prereza B ostane nad osjo vodovoda, torej da kinetični del energije zagotavlja pretok po cevi. Dovolj visoko postavljeno energijsko črto lahko dosežemo z visoko lego vodohrana, tako da s pomočjo potencialne energije povečamo energijo v omrežju, vmesni dvig energijske črte pa zagotovimo s črpalko, ki v omrežje doda energijo. To energijo odvezamo iz električnega omrežja, porabo pa narekuje moč črpalke. Moč črpalke je odvisna od pretoka črpalke (Q), dviga energijske črte v [m] (h), izkoristka črpalke (η) ter gostote vode in težnostnega pospeška [2]:

$$N = \frac{\rho g Q h}{\eta}, \quad (19)$$

Poleg energijskih izgub dodano energijo porabljajo tudi terenski dvigi cevi. Vodovodna omrežja namreč ne ležijo v isti ravnini, temveč se tudi vertikalno prilagajajo reliefu. Poleg tega na posameznih odsekih omrežja z vzdolžno razgibanostjo v visokih legah zagotovimo mesta za izpust zraka, v nizkih legah pa mesta za izpust trdnih delcev [4]. Za premagovanje teh ovir lokalnih izgub so torej nujno potrebni črpalni sistemi.

2.3.1 Črpalna in črpalna krivulja

V hidravlični sistem je zaradi razgibanosti reliefa, topologije omrežja ter linijskih in lokalnih izgub pogosto potrebno dovesti energijo. To energijo, izraženo v metrih vodnega stolpca (VS), vodi v sistemu dodajo črpalke z opravljanjem mehanskega dela, predstavljena pa je kot dodana črpalna višina. V vodovodnih omrežjih se najpogosteje uporabljajo centrifugalne črpalke: voda po cevi priteče v središče centrifugalne črpalke in po vrtečih se lopaticah, ki jih poganja motor, pospeši ter odteče navzven (slika 4a). Ohišje črpalke z razširitvijo zmanjša hitrost vode do izstopa iz črpalke (slika 4b).



Slika 4: Centrifugalna črpalna (Walski et al., 2003, str. 95)

Črpalna višina je odvisna od pretoka skozi črpalno in se podaja s črpalno krivuljo. Večji kot je pretok skozi črpalno, manjša je črpalna višina in obratno, manjši kot je pretok, višje lahko črpalna prečrpa vodo (enačba 19). Odvisnost med črpalno višino in pretokom skozi črpalno je odvisna od konstrukcije črpalke in je nelinearna. Matematični opis te odvisnosti ni enoličen in je odvisen od numeričnega modela, ponavadi pa krivuljo predstavlja polinom. Poznati moramo karakteristične točke krivulje (maksimalen pretok pri minimalni črpalni višini, maksimalna črpalna višina pri pretoku nič, točka obratovanja) in po potrebi tudi vmesne točke. Pogosto se črpalno krivuljo določi s funkcijo [3]:

$$h = h_0 - cQ^m, \quad (20)$$

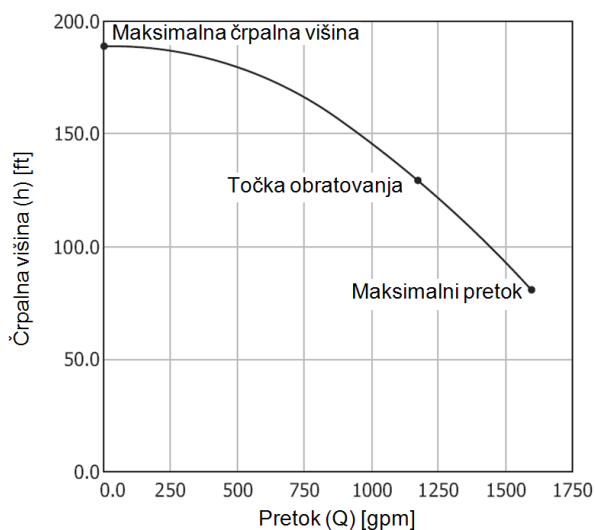
kjer h predstavlja črpalno višino, h_0 maksimalno črpalno višino, Q pretok črpalke, c in m pa sta koeficienta za prilagajanje oblike črpalne krivulje uporabljenemu tipu črpalke.

Črpalno krivuljo nove črpalke poda proizvajalec. Toda dolgoročna uporaba in številni vklopi in izklopi črpalke povzročijo obrabo rotorja ali okvaro motorja, zato je lahko katerikoli od delov v življenjski dobi črpalke manj ali tako obrabljen, da črpalna krivulja proizvajalca ni več

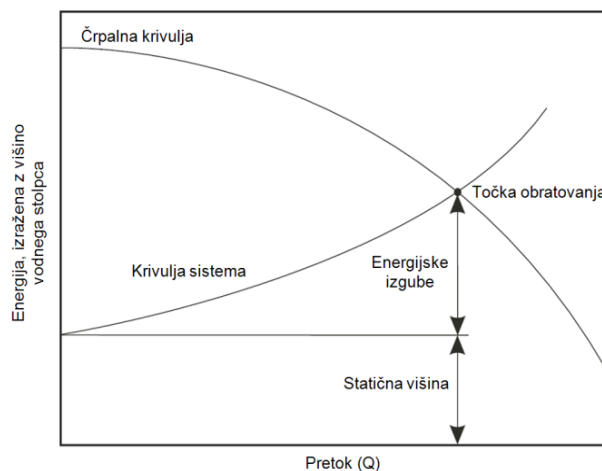
merodajna. V takem primeru je potrebno z meritvami pretoka in črpalne višine ponovno konstruirati črpalno krivuljo.

2.3.2 Krivulja sistema in točka obratovanja črpalke

Energija, ki jo v hidravlični sistem dodamo s črpalko, mora zagotoviti premagovanje višinskih razlik v vodovodnem omrežju in biti večja od vsote energijskih izgub, da sta zagotovljena ustrezen pretok in tlak v omrežju. Višinske razlike so neodvisne od pretoka črpalke, zato je zahtevana energija za premagovanje teh razlik konstantna, imenovana statična višina. Nasprotno pa energijske izgube naraščajo s pretokom⁵, zato kumulativna potrebna energija, ki je na sliki 6 prikazana s krivuljo sistema, narašča s pretokom in je odvisna tudi od porabe ter količine (višine gladine) vode v vodohranu. Krivulja sistema se torej spreminja s porabo in količino vode v vodohranu, črpalna krivulja pa je za določeno črpalko pri določeni hitrosti nespremenjena. Če obe krivulji prikažemo na grafu energije (izražene v metrih vodnega stolpca) v odvisnosti od pretoka, v presečišču dobimo točko obratovanja črpalke. Ta točka pove, s kolikšnim pretokom mora delovati črpalka, da zagotavlja ustrezno črpalno višino za tlak in pretok v vodovodnem omrežju. Z dviganjem ali spuščanjem krivulje potrebne energije se premika tudi točka obratovanja.



Slika 5: Črpalna krivulja
(Walski et al., 2003, str. 45)



Slika 6: Točka obratovanja
(Walski et al., 2003, str. 48)

2.3.3 Črpalka s spremenljivo hitrostjo

Za vsako hitrost centrifugalne črpalke in velikost rotorja obstaja pripadajoča črpalna krivulja. Pri običajnih črpalkah z nespremenljivo hitrostjo vrtenja rotorja (lopatic) obstaja le ena črpalna krivulja, pri črpalkah s spremenljivo hitrostjo pa več črpalnih krivulj. Če s Q_1 in Q_2

⁵ Kontinuitetna enačba pove, da je pretok odvisen od površine prečnega prereza cevi in hitrosti toka. Centrifugalna črpalka poveča pretok s povečanjem hitrosti toka.

označimo pretoka črpalke pri dveh različnih hitrostih, z n_1 in n_2 različni hitrosti in s h_1 in h_2 črpalni višini pri dveh različnih hitrostih, lahko zapišemo razmerji [3]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{in} \quad \frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (21)$$

Če poznamo črpalno krivuljo pri neki hitrosti, lahko s temi razmerji in z enačbo črpalne krivulje (20) določimo črpalno krivuljo pri poljubni drugi hitrosti.

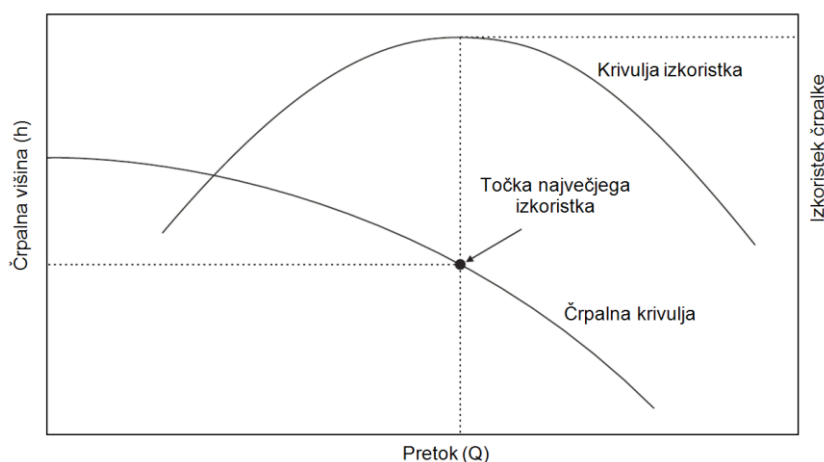
2.3.4 Izkoristek črpalke

Motor črpalke električno energijo pretvori v mehansko delo, ki se prek lopatic (rotorja) prenaša na vodo. Pri vsakem prenosu se del energije pretvori v nepovratno obliko, zato izkoristek ni popoln. Izkoristek črpalke je razmerje med močjo črpalke (prenos energije prek lopatic na vodo⁶) in močjo motorja, ki poganja črpalko.

$$\eta = \frac{P}{P_m}, \quad (22)$$

kjer je P moč črpalke in P_m moč motorja. Izkoristek črpalke je odvisen od vrste in velikosti črpalke, velikosti in oblikovanosti lopatic, oblikovanosti notranjega dela ohišja in odtočnega ustja črpalke, hitrosti delovanja črpalke, nepravilnosti in zamikov, ki povzročajo dodatno trenje in od mnogih drugih dejavnikov. Izkoristki večjih centrifugalnih črpalk se gibljejo med 75% in 90%, manjših pa med 50% in 70% [5].

Izkoristek črpalke je največji pri določenem pretoku, pri katerem krivulja izkoristka doseže maksimum. Izbrati moramo črpalko s tako nazivno močjo (N), ki izpolnjuje zahtevo omrežja po dodani energiji in ima pri zahtevanem pretoku čim večji izkoristek, saj tako dosežemo nižje stroške obratovanja.

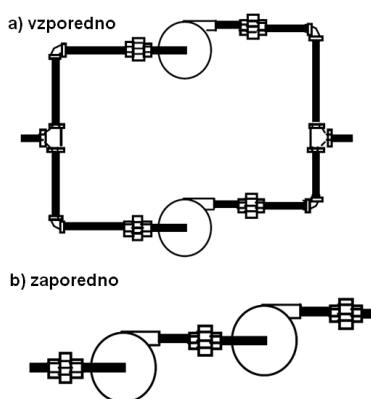


Slika 7: Izkoristek črpalke (Walski et al., 2003, str. 49)

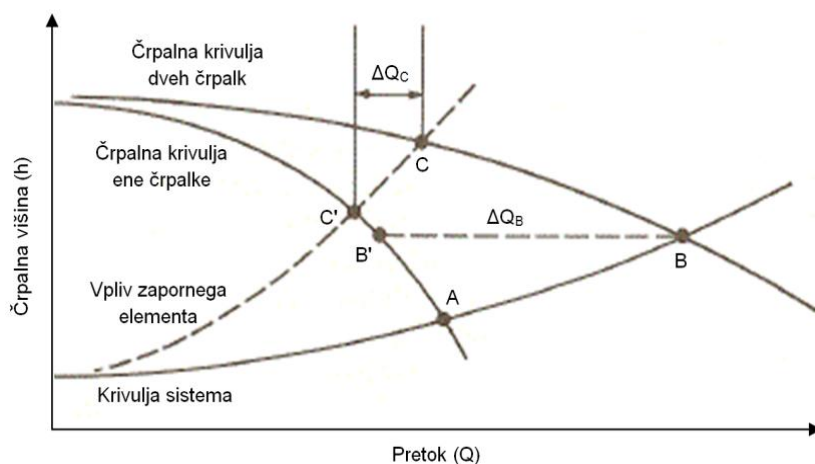
⁶ To je delo, ki ga opravi črpalka – delo črpalke.

2.3.5 Sistem več črpalk

Za zagotavljanje ustreznega pretoka in tlaka v vodovodnem omrežju le ena črpalka ne zadostuje, zato je potrebno uporabiti več črpalk hkrati. Več črpalk lahko uporabimo za povečanje pretoka ali črpalne višine. Povečanje pretoka dosežemo z vzporedno vgradnjo črpalk (slika 8a), povečanje črpalne višine pa z zaporedno vgradnjo (slika 8b). Pri slednji pretok omejuje maksimalni pretok, ki ga dopušča vsaka od črpalk (predpostavlja se, da sta črpalni enaki), črpalna višina pri tem pretoku pa je enaka 0. Maksimalna črpalna višina sistema obeh črpalk je pri pretoku 0 enaka dvakratniku črpalne višine ene črpalke. Pri vmesnih pretokih se črpalna višina ne poveča za faktor 2, temveč nekoliko manj, saj točko obratovanja dveh črpalk v zaporedni vgradnji pogojuje tudi krivulja sistema. Sistem dveh črpalk v zaporedni vgradnji v primerjavi z eno črpalko torej obratuje pri nekoliko večjem pretoku in pri nekoliko večji črpalni višini, le-ta pa je manjša od dvakratnika črpalne višine ene črpalke. Pri vzporedni vgradnji pa povečanje energijskih izgub pride še bolj do izraza, saj je namen te vgradnje povečanje pretoka, večji pretok po istih ceveh pa pomeni večjo hitrost toka. Ker so energijske izgube sistema zaradi povečane hitrosti večje, morajo črpalke dovesti več energije; potrebna črpalna višina je višja. Dve enaki črpalke v vzporedni vgradnji torej ne zagotavljata dvakrat večjega pretoka kot ena črpalka, temveč nekoliko manjši pretok. Če so uporabljeni tudi zaporni elementi, so energijske izgube zaradi lokalnih izgub še večje, zato je lahko pretok dveh vzporednih črpalk bistveno manjši od dvakratnika pretoka ene črpalke. Problematika vzporedne vgradnje črpalk je prikazana na sliki 9. Točka A predstavlja točko obratovanja ene črpalke, točka B pa točko obratovanja sistema dveh črpalk v vzporedni vgradnji. Točka B' je hipotetična in služi le za lažjo predstavo manjšega pretoka posamezne črpalke v sistemu dveh črpalk. Povečanje pretoka ΔQ_B zaradi uporabe dodatne črpalke je manjše od dvakratnika pretoka v točki A. Točki C' in C sta točki obratovanja ene črpalke in sistema dveh črpalk v primeru uporabe zapornih elementov. Prirastek pretoka, označen z ΔQ_C , je v tem primeru bistveno manjši od prirastka pretoka ΔQ_B v primeru, ko zaporni elementi niso uporabljeni.



Slika 8: Vgradnja črpalk [6]



Slika 9: Vzporedna vgradnja dveh črpalk [7]

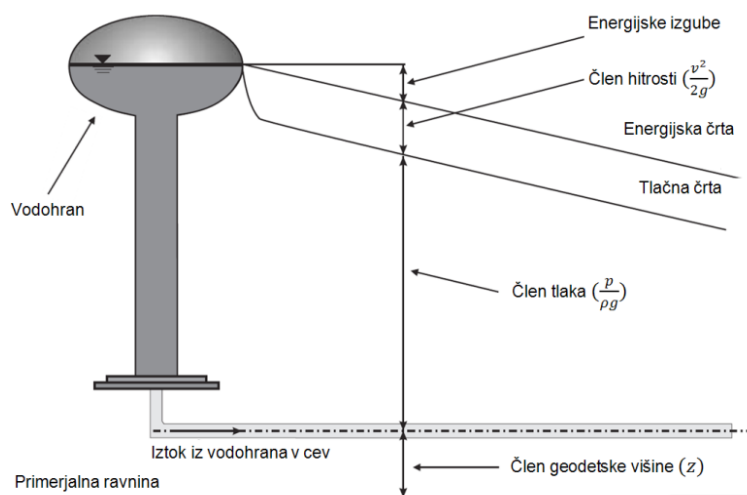
2.3.6 Rezervoar in vodohran

Pri hidravličnem modeliranju se predpostavlja, da vodni vir, npr. rezervoar predstavlja neomejen vir vode za hidravlični sistem. To je točka vnosa vode v sistem. V naravi seveda ni neomejenih virov vode, vendar pogosto obstajajo viri vode s tako veliko kapaciteto, da nanje vtok in iztok reda velikosti kot pri vodovodnem omrežju nimata bistvenega vpliva, zato jih lahko smatramo kot (za naselje) neomejene vire: jezera, reke, podtalnica,...

Vodohran je tako kot rezervoar robna točka omrežja, vendar gladina vode v njem niha z vtokom in iztokom, tako da ga lahko popolnoma napolnimo ali izpraznimo do minimuma⁷. Z vodohrani akumuliramo vodo v nočnem času, ko je poraba praviloma nizka, podnevi pa shranjeno vodo porabljamo za zagotavljanje zadostne količine vode ob dnevnih višjih porabe [4]. Pri črpanju vode v višje ležeči vodohran moramo upoštevati energijske izgube po ceveh od mesta črpanja do vodohrana, zato mora biti črpalna višina višja od maksimalne gladine vode v vodohranu (slika 11).

2.3.7 Delovanje vodohrana

Ker imajo vodohrani velik volumen, je gibanje vode v njih zelo počasno, zato privzamemo, da je člen hitrosti v energijski enačbi enak nič. Posledično sta tlačna črta in energijska črta izenačeni. Ob iztoku iz vodohrana (tok v cevi) se gibanje vode znatno poveča, zato se v energijski enačbi pojavi tudi hitrostni člen. Energijska in tlačna črta se zato ločita in vzdolž cevi zaradi energijskih izgub padata.



Slika 10: Iztok iz vodohrana (Walski et al., 2003, str. 87)

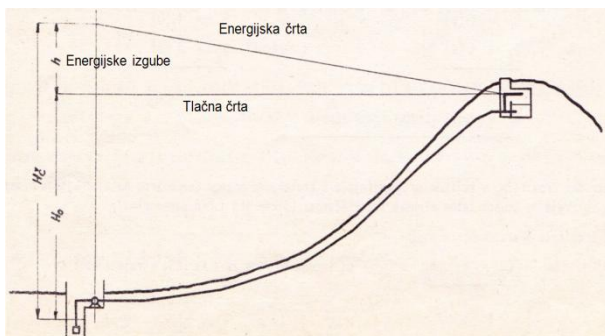
Nivo gladine vode v vodohranu je omejen na minimalno in maksimalno vrednost, preostali del pa zapolnjuje zrak. Vodohrane ločimo po obliki, materialu, lastništvu, itd., vendar je najpomembnejša delitev po načinu delovanja.

⁷ V praksi vodohrana ne izpraznimo popolnoma; z vodno blazino preprečimo vstop zraka v sistem.

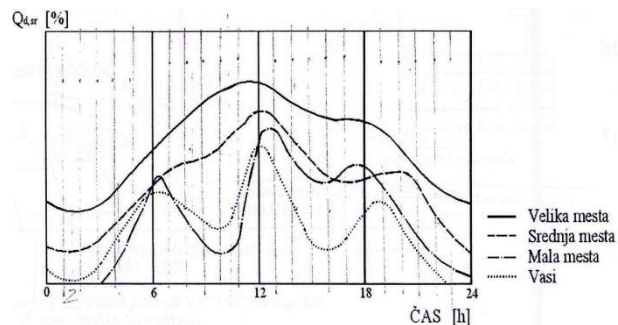
- 1 Običajni vodohran: absolutni tlak zraka v vodohranu je enak zračnemu tlaku; $p = p_0$. Višina tlačne črte je tik ob iztoku iz vodohrana enaka višini gladine vode (in energijske črte) v vodohranu. Z višjo lego vodohrana od vodovodnega omrežja izkoriščamo potencialno energijo vode.
- 2 Hidropnevmatični vodohran: absolutni tlak zraka v vodohranu je večji od zračnega tlaka; $p > p_0$. Tlačna črta je višja od gladine vode.
- 3 Vodohran, iz katerega moramo črpati vodo: vodohran ni zaprta komora s povečanim zračnim tlakom in ne dodaja potencialne energije vode, zato moramo s črpalkami dodati energijo.

2.3.8 Nihanje porabe vode

Poraba vode v vodovodnem omrežju nekega območja ni enakomerna, temveč niha po določenih vzorcih, odvisno od časovnega obdobja. Za dimenzioniranje vodovodnih omrežij sta pomembna podatka o maksimalni (kritični) dnevni porabi⁸ ter o urni neenakomernosti porabe vode, torej dnevno nihanje porabe po urah. Dnevno nihanje porabe je odvisno od velikosti in tipa naselja ali območja (spalno naselje, poslovno območje, industrijska cona,...)



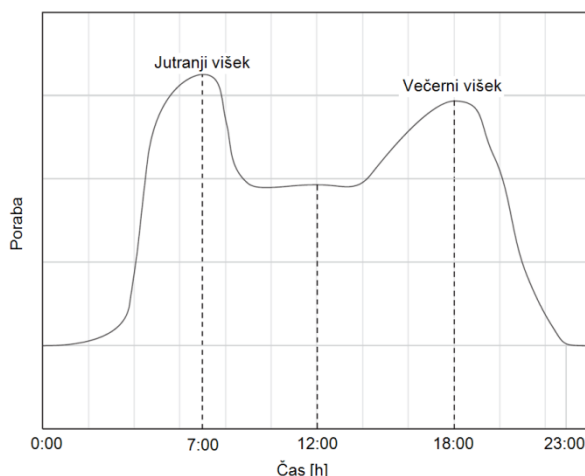
Slika 11: Običajni vodohran
(Sketelj, 1957, str. 109)



Slika 12: Vpliv velikosti naselja na dnevno nihanje porabe
(Panjan, 2002, str. 28)

Tipičen vzorec dnevne porabe za naselje ima dva viška (zjutraj in popoldan) ter minimum ponoči. Nihanje dnevne porabe računsko določimo tako, da s koeficienti neenakomernosti množimo srednjo dnevno porabo, ki je konstantna.

⁸ Tako kot se urna poraba spreminja tekom dneva, se tudi dnevna poraba spreminja tekom leta in v poletnih mesecih doseže maksimum. Ta maksimum je merodajen za dimenzioniranje vodovodnega omrežja.



Slika 13: Vzorec dnevne porabe z dvema viškoma
(Walski et al., 2003, str. 156)

Poleg ciljnih porabnikov je potrebno za dimenzioniranje omrežja upoštevati tudi izgube vode (puščanja v omrežju, nepopisana poraba ali napake na merilcih porabe, itd.) ter zahtevani minimalni pretok v primeru požara.

2.4 Program EPANet 2.0

2.4.1 Razvoj in opis programa EPANet 2.0

Reševanje problemov na področju hidravlike lahko zelo olajša ustrezen računalniški program, kot je na primer EPANet 2.0. Razvit je bil pri agenciji za varstvo okolja Združenih držav Amerike (U.S. Environmental Protection Agency). Privzet je ameriški merski sistem⁹, vendar program omogoča tudi računanje z mednarodno uveljavljenimi merskimi enotami¹⁰, ki jih uporabljamo tudi v Sloveniji. EPANet 2.0 s simuliranjem gibanja in kvalitete vode omogoča hidravlično modeliranje in modeliranje kvalitete vode v vodovodnih omrežjih, kar vključuje neomejeno velikost omrežja, različne pristope določanja energijskih izgub in upoštevanje lokalnih izgub, upoštevanje različnih vrst črpalk ter izračun stroškov in energije črpanja, upoštevanje različnih vrst zapornih elementov ter oblik vodohranov, upoštevanje različnih kategorij in časov porabe, simuliranje gibanja indikatorjev ali onesnažil po omrežju, simuliranje razgradnje škodljivih snovi s časom,... [8]

Za določitev linijskih izgub je najbolj točna enačba Darcy-Weisbach (D-W), vendar program poleg te ponuja tudi enačbi Chezy-Manning (C-M) in Hazen-Williams (H-W). Slednja je v programu privzeta, saj je tudi sicer najpogosteje uporabljena v ameriški literaturi. Koeficienta hrapavosti, ki nastopata v enačbah C-M in H-W, v EPANet 2.0 vnašamo brez dimenzije. V enačbi Darcy-Weisbach pa nastopa absolutna višina hrap v vodovodu (ϵ), ki je v EPANet 2.0 podana z enoto mft ali mm, odvisno od izbranega merskega sistema. Koeficienti hrapavosti

⁹ United States Customary units

¹⁰ Système International d'Unités; metrični sistem enot

so običajno tabelirani za različne vrste materialov cevi. Vse tri enačbe linijskih izgub so v programu podane v splošni obliki:

$$h_L = Aq^B, \quad (23)$$

kjer h_L , ($h_L = \Delta E_{tr}$), predstavlja energijske izgube (angleško »headloss«), q pretok, A koeficient upora in B eksponent pretoka. Koeficient upora je rezultat več koeficientov, tudi za posamezno enačbo značilnega koeficienta hrapavosti, in je za vsako izmed treh enačb drugačen.

Preglednica 3: Koeficienti hrapavosti za nove cevi (Rossman, 2000, str. 31)

Material	Hazen-Williams C (brezdimenzijski)	Darcy-Weisbach ϵ (čevlji $\times 10^{-3}$)	Manning n (brezdimenzijski)
Litoželezo	130 – 140	0.85	0.012 – 0.015
Beton	120 – 140	1.0 – 10	0.012 – 0.017
Galvanizirano železo	120	0.5	0.015 – 0.017
Plastika	140 – 150	0.005	0.011 – 0.015
Jeklo	140 – 150	0.15	0.015 – 0.017
Vitrificirana glina	110		0.013 – 0.015

V EPANet 2.0 je laminarni režim toka definiran za $Re < 2000$, prehodni režim za $2000 < Re < 4000$ in turbulenten režim za $Re > 4000$. Če za računanje energijskih izgub izberemo enačbo Darcy-Weisbach, EPANet 2.0 koeficient trenja (λ) določa po naslednjih enačbah:

- 1 enačba Hagen-Poiseuille za območje laminarnega režima toka:

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \quad Re < 2000 \quad (24)$$

- 2 Kubična interpolacija Moodyjevega diagrama za prehodno območje:

$$\lambda = \left(X_1 + R(X_2 + R(X_3 + X_4)) \right); \quad 2000 < Re < 4000, \quad (25)$$

$$R = \frac{Re}{2000} \quad (25.1)$$

$$X_1 = 7FA - FB \quad (25.2)$$

$$X_2 = 0,128 - 17FA + 2,5FB \quad (25.3)$$

$$X_3 = -0,128 + 13FA + 2FB \quad (25.4)$$

$$X_4 = R(0,032 - 3FA + 0,5FB) \quad (25.5)$$

$$FA = (Y_2)^{-2} \quad (25.6)$$

$$FB = FA \left(2 - \frac{0,00514215}{Y_1 Y_2} \right) \quad (25.7)$$

$$Y_1 = \frac{\epsilon}{3,7d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \quad (25.8)$$

$$Y_2 = 0,86859 \ln \left(\frac{\epsilon}{3,7d} + \frac{5,74}{4000^{0,9}} \right) \quad (25.9)$$

3 Swamee-Jain aproksimacija enačbe Colebrook-White¹¹ za območje izrazite turbulence:

$$\lambda = \frac{0,25}{\left[\ln\left(\frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)\right]^2} ; Re > 4000 \quad (26)$$

S sklicevanjem na enačbe (25.1) – (25.9) lahko krajše zapišemo:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{64}{Re} ; Re < 2000 \\ \left(X_1 + R(X_2 + R(X_3 + X_4))\right) ; 2000 < Re < 4000 \\ \frac{0,25}{\left[\ln\left(\frac{\varepsilon}{3,7d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)\right]^2} ; Re > 4000 \end{cases} \quad (27)$$

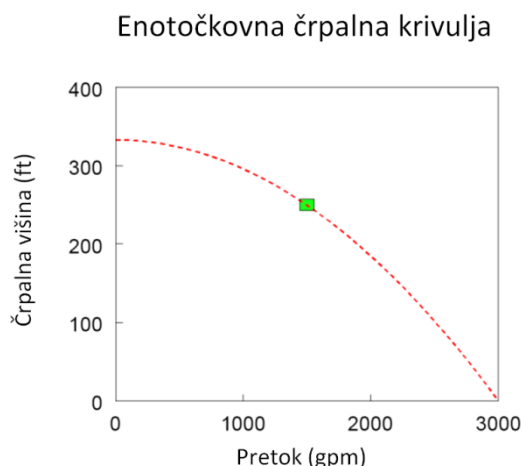
Lokalne izgube so upoštevane po enačbi:

$$h_L = K \left(\frac{v^2}{2g}\right), \quad (28)$$

K je koeficient lokalne izgube. Te izgube so v programu upoštevane po potrebi, t.j. glede na velikost omrežja in zahtevano natančnost.

EPANet 2.0 omogoča modeliranje z navadnimi črpalkami in s črpalkami s spremenljivo hitrostjo. Črpalno krivuljo lahko opišemo z eno, tremi ali več točkami.

Enotočkovna črpalna krivulja je podana s točko obratovanja črpalke (obratovalni pretok in obratovalna črpalna višina). EPANet 2.0 nato sam določi dve dodatni točki. Prva predstavlja pretok 0 in maksimalno višino, ki je določena kot obratovalna višina, pomnožena s faktorjem 1,33. Druga točka predstavlja črpalno višino 0 in maksimalni pretok, ki je enak dvakratniku obratovalnega pretoka.



Slika 14: Enotočkovna črpalna krivulja
(Rossman, 2000, str. 35)

¹¹ V grafični obliki je predstavljena z Moodyjevim diagramom.

Tritočkovna črpalna krivulja je podana s točko minimalnega pretoka (pretok 0 ali zelo majhen pretok in pripadajoča črpalna višina), s točko obratovanja črpalke in s točko maksimalnega pretoka (maksimalni pretok in pripadajoča črpalna višina). EPANet 2.0 poišče zvezno funkcijo oblike

$$h_G = A - Bq^C, \quad (29)$$

ki se najbolje prilega trem opisanim točkam (h_G je črpalna višina, q je pretok, A, B in C so konstante). Večtočkovna črpalna krivulja je podana z več kot tremi točkami, ki so linearno povezane.

Za črpalno s spremenljivo hitrostjo za več hitrosti določimo več črpalnih krivulj. Črpalne krivulje določamo z relativnim faktorjem: črpalna krivulja nazivne hitrosti ima relativni faktor 1, črpalna krivulja manjše hitrosti ima manjši faktor, črpalna krivulja večje hitrosti pa večji faktor. Veljata relaciji v enačbi (20). Slike tritočkovne in večtočkovne črpalne krivulje ter črpalnih krivulj črpalke s spremenljivo hitrostjo so podane v prilogah od A 4 do A 6.

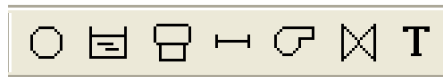
Poleg črpalne krivulje v programu določamo tudi krivuljo izkoristka za črpalke, krivuljo prostornine za vodohrane, krivuljo energijskih izgub, časovne vzorce porabe vode ali drugih količin ter lahko programiramo pravila za delovanje omrežja.

2.4.2 Uporaba programa EPANet 2.0

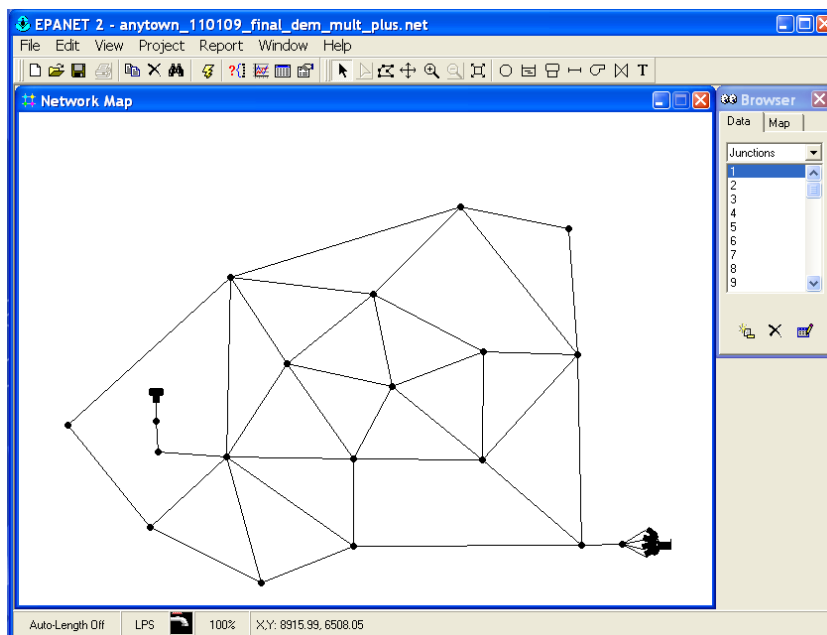
Grafični vmesnik programa ima tri glavna področja: orodno vrstico in dve okni: karto omrežja (Network Map) ter brskalnik (Browser). V orodni vrstici so gumbi za ravnanje s podatki, mreže in rezultatov. V večje okno, t.j. karto omrežja, vstavljamo elemente, ki gradijo omrežje. V orodni vrstici izbiramo med različnimi elementi:

- 1 osnovni: vozlišče, rezervoar in vodohran,
- 2 povezovalni: cev, črpalna in ventil,
- 3 opisovalni: besedno polje.

Na sliki 15 so predstavljeni gumbi za vstavljanje elementov v naslednjem vrstnem redu: vozlišče, rezervoar, vodohran, cev, črpalna, ventil in besedno polje.



Slika 15: Gumbi orodne vrstice za vstavljanje elementov



Slika 16: EPANet 2.0 grafični vmesnik

Property	Value
*Pipe ID	7
*Start Node	7
*End Node	8
Description	Res
Tag	
*Length	1828.80
*Diameter	203.200
*Roughness	0.243
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	6.57
Velocity	0.20
Unit Headloss	0.26
Friction Factor	0.025
Reaction Rate	0.00
Quality	0.00
Status	Open

Slika 17: Podatki o elementu

Vsak element ima svoje koordinate in ga lahko vnesemo tudi prek brskalnika s podajanjem koordinat. Če je omrežje že vnaprej pripravljeno, ga lahko uvozimo v EPANet 2.0. Poleg omenjenih elementov, ki jih vnašamo v karto omrežja, obstajajo še tri vrste elementov, ki jih urejamo, na primer prek brskalnika: krivulje (črpalna krivulja, krivulja izkoristka,...), časovni vzorec in ukazi (programiranje pravil za delovanje omrežja). Do vseh elementov na karti omrežja lahko dostopamo prek brskalnika, s katerim urejamo tudi njihove ostale karakteristike: podatki o višini¹² in pretoku, časovni vzorec porabe, kvaliteta vode, hidravlični tlak¹³, premer cevi, koeficiente izgub in druge koeficiente,...

Okno s prikazom podatkov o izbranem elementu je predstavljeno na sliki 17. Okno je sestavljeno iz dveh delov: zgornji del vsebuje karakteristične vrednosti elementa, ki jih poda uporabnik z vnosom v polja, spodnji del s svetlejšimi polji pa vsebuje izračunane vrednosti.

2.5 Genetski algoritmi

Evolucijski algoritmi, med katere uvrščamo tudi genetske algoritme, so stohastični iterativni postopki za generiranje potencialnih rešitev za nek problem. Nastali so po vzoru narave, saj s posnemanjem reprodukcijskih vzorcev in zakonitosti narave generirajo nove možne rešitve. Algoritem razpolaga s skupino t.i. osebkov, ki tvorijo populacijo P . Vsak osebek, ki je sestavljen iz enega ali več kromosomov, predstavlja potencialno rešitev. Vsak kromosom je skupek genov, ki lahko zavzemajo različne vrednosti. Začetna populacija je generirana naključno, hevristično, nadaljne modifikacije pa so stohastične, zato imajo evlucijski

¹² Karta omrežja izriše 2-D sliko (tloris) omrežja.

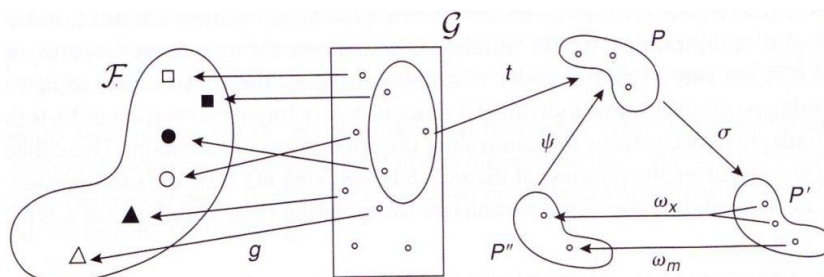
¹³ V EPANet 2.0 podamo hidravličnih tlak izražen v metrih ali čevljih vodnega stolpca, odvisno od merskega sistema.

(genetski) algoritmi včasih tudi oznako »metahevristični«. Vsakemu osebk v populaciji P se pripiše ocena ustreznosti, ki pove, kako dobra je rešitev (ki jo določeni osebek predstavlja) za dani problem [9].

Na spodnji shemi je prikazan proces generiranja rešitev z evolucijskim algoritmom. Množica F predstavlja fenotip. To je množica vseh rešitev danega problema. Množica G je množica različnih osebkov, izmed katerih jih nekaj predstavlja ustrezne zametke rešitev, zato so s funkcijo rasti g preslikani v množico F . Funkcija g je sicer lahko identična funkcija, kar pomeni, da so nekateri osebki iz G že dejanske možne rešitve, vendar ni nujno vedno tako. Funkcija t , imenovana inicializacijska funkcija, izbere določene osebkke iz množice G . Ti osebki oblikujejo začetno populacijo P in predstavljajo potencialne rešitve. Evolucijski algoritem nato z iterativnim postopkom spreminja to populacijo tako, da izboljša nekatere osebkke. Iterativni postopek ima tri glavne faze:

- 1 *Selekcija*: na podlagi ocene ustreznosti se osebkke, ki obetajo boljše rešitve, s funkcijo σ izbere in izloči iz začetne populacije P in iz njih oblikuje populacijo P' .
- 2 *Reprodukcija*: reprodukcijske funkcije ω s spreminjanjem lastnosti osebkov populacije P' oblikujejo nove osebkke – populacijo P'' .
 - 2.1 *Rekombinacija*: postopek izmenjave informacij med osebki. S posameznimi geni izbranih starševskih osebkov se sestavi nov osebek, ki je nova potencialna rešitev.
 - 2.2 *Mutacija*: postopek modifikacije genov, ki skrbi za raznolikost osebkov v populaciji. Mutacijski operator osebkov ne sme preveč spremeniti, saj bi sicer rešitve postale preveč naključne.
- 3 *Zamenjava*: funkcija zamenjave ψ z novimi osebki iz populacije P'' nadomesti nekatere osebkke v začetni populaciji P .

Ta postopek se ponavlja, dokler ni izpolnjen določen kriterij, običajno je to kar predpisano število iteracij. Vsaka iteracija se imenuje »generacija« [9].



Slika 18: Poenostavljen prikaz evolucijskega algoritma (Olariu, Zomaya, 2006, str. 5)

Z genetskimi in ostalimi evolucijskimi algoritmi torej poiščemo boljše potencialne rešitve iz množice vseh potencialnih rešitev, ter jih modificiramo tako, da dobimo nabor najboljših možnih rešitev. Prednost genetskih algoritmov pred običajnimi metodami optimizacije je, da namesto poenostavitve problema (na primer linearizacija) uporabljajo zahtevnejše postopke,

ki dajo boljše potencialne rešitve. Pomanjkljivost teh algoritmov pa je, da je težko oceniti, za koliko dobljene rešitve odstopajo od globalnega optimuma, oziroma ali je globalni optimum dosežen¹⁴ [10].

2.5.1 Sistemi za podporo pri odločanju

Razvoj računalnikov in programske opreme je na številnih področjih omogočil reševanje problemov, ki so bili prej v matematičnem smislu analitično težko rešljivi ali celo nerešljivi, bodisi zaradi prevelike zahtevnosti problema, preobsežne količine podatkov za obdelavo, ipd. V zadnjih nekaj desetletjih pa sta se dostopnost in zmogljivost računalnikov tako povečali, da sta omogočili pojav novih metod za reševanje problemov (na primer metoda končnih elementov v gradbeništvu) in nasploh prispevali k razvoju številnih drugih vrst znanosti. Med drugimi so nastali tudi programi in sistemi za podporo pri odločanju, ki se pogosto označujejo z angleško kratico DSS (angl. Decision Support System). Pri reševanju optimizacijskega problema tak program z uporabo algoritmov poišče eno ali več možnih rešitev, odvisno od števila kriterijev za optimizacijo, in jih predstavi v grafični, tabelarični, ali drugi obliki. Uporabnik nato ob upoštevanju morebitnih drugih pogojev, ki jih v program ni bilo mogoče vnesti, izbere končno rešitev.

Kljub prednostim, ki jih programi za podporo pri odločanju prinašajo, je na tem mestu smiselno opozoriti na nekatere pomanjkljivosti. Ker temeljijo na kompleksnih algoritmih za iskanje možnih rešitev, zahtevata razvoj in uporaba takih programov veliko strokovnega znanja. Tega običajni uporabnik nima, zato je uporaba zanj lahko zamudna in nezanimiva, potencial programa pa neizkoriščen. Glavna vzroka za to sta [10]:

- 1 Bodoči uporabniki ne sodelujejo pri razvoju programov za podporo pri odločanju,
- 2 Včasih so programi za podporo pri odločanju prezahtevni za uporabnike, čeprav so razumljivi strokovnjakom, ki so jih razvili.

Razvoj programov za podporo pri odločanju naj bi zato temeljil na interakciji med uporabniki in programerji in prototipih med razvojem programov za podporo pri odločanju.

2.6 Program GANetXL

2.6.1 Opis programa GANetXL

Da bi odpravili pomanjkljivosti programov za podporo pri odločanju so si avtorji programa GANetXL zadali naslednje cilje:

¹⁴ Predvideva se visoka stopnja uspešnosti.

- 1 Enostavna uporaba večkriterijskih optimizacijskih, genetskih algoritmov, da lahko uporabniki zanesljivo dobijo dobre Pareto rešitve (boljše kot pri metodi poskusov in napak – pri simulacijah).
- 2 Splošen program za podporo pri odločanju v obliki dodatka v Excelu, s čimer se zagotovi dostopnost za čim več uporabnikov.
- 3 Zagotoviti intuitiven grafični vmesnik, ki omogoča vsakdanjemu uporabniku definiranje optimizacijskega problema, izvedbe optimizacije in analizo rezultatov.
- 4 Zmanjšati količino programiranja med optimizacijo in simulacijo, ki je potrebna za ovrednotenje dobljenih rešitev.

Kot nakazuje točka 1, program GANetXL z uporabo genetskih algoritmov omogoča enokriterijsko in večkriterijsko optimizacijo in vrednotenje rezultatov. Pomanjkljivost enokriterijske optimizacije je, da se iz več kriterijev oblikuje nov kriterij, ki je nato predmet optimizacije. Če je narava kriterija taka, da je optimalna najmanjša možna vrednost, lahko enokriterijsko optimizacijo formuliramo tako [11]:

$$\min_{x \in S} f(x) \quad (30)$$

kjer je f skalarna funkcija, ki opisuje kriterij (lahko jo poimenujemo tudi kriterijska funkcija), S pa množica omejitev. Težava lahko nastane pri oblikovanju novega kriterija, ki lahko slabo opisuje prvotne kriterije in zato ni reprezentativen, zaradi česar optimizacija ne da nujno najboljših rešitev. To pomanjkljivost odpravlja večkriterijska optimizacija, ki v enem koraku optimizira več kriterijev hkrati:

$$\min_{x \in S} [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \quad (31)$$

kjer je $n > 1$ in S množica, v kateri je smiselno iskati rešitve. Pogosto si kriteriji med seboj nasprotujejo¹⁵, kar privede do iskanja kompromisa in nabora rešitev, ki so optimalne, t. i. Pareto rešitev. Pareto rešitev opišemo z vektorjem

$$x^* = (f_1(x^*), f_2(x^*), \dots, f_n(x^*)) \quad (32)$$

za katerega velja¹⁶:

$$f_i(x) \geq f_i(x^*) \Leftrightarrow f_j(x) \leq f_j(x^*), \quad i \neq j \quad (33)$$

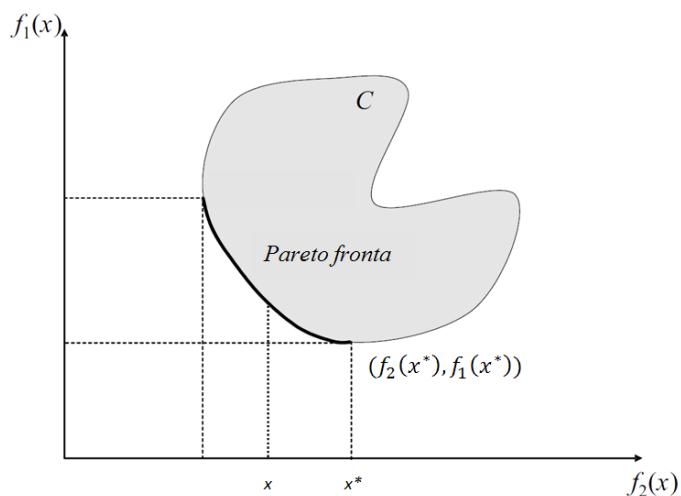
za $1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq n$, $i, j \in N$. Značilnost Pareto rešitev je, da se vrednost ene kriterijske funkcije lahko izboljša le, če se poslabša vrednost vsaj ene od ostalih kriterijskih funkcij; posledično gre za iskanje najboljših kompromisov. Pareto rešitve so zato superiorne rešitve (v angleški terminologiji se uporablja izraz »non-dominated«), ki skupaj z ostalimi, inferiornimi rešitvami tvorijo območje vseh možnih rešitev:

$$C = \{y \in R^n : y = f(x), x \in S\}. \quad (34)$$

¹⁵ Na primer večkriterijski optimizacijski problem, pri katerem se po vseh kriterijih zahteva čim nižje vrednosti rešitev.

¹⁶ V primeru, ko so optimalne minimalne vrednosti kriterijskih funkcij f_i in f_j .

Meja območja, ki jo sestavljajo Pareto rešitve, se imenuje tudi Pareto fronta.



Slika 19: Pareto fronta (Caramia, Dell'Olmo, 2008, str. 13)

Ker program GANetXL nudi možnost večkriterijske optimizacije, je primeren za podporo pri odločanju tudi pri problemih na področju vodarstva (ukrepi pri onesnaženju podtalnice, izraba vodnih virov, oskrba naselja z vodo in obnova omrežja,...), ki običajno zahtevajo upoštevanje več kriterijev hkrati. [10]

Program se uporablja kot dodatek v programu Excel, v katerem se izbran list preimenuje v »Problem«. Na tem listu določimo vhodne podatke o raziskovanem problemu, odločitvene spremenljivke ter izhodne podatke modela. Vsa manipulacija z GANetXL se izvaja prek zavihka »dodatki«, ki po uspešni namestitvi programske opreme omogoča nastavljanje in prilagoditev programa za uporabo, na primer določanje parametrov genetskega algoritma.

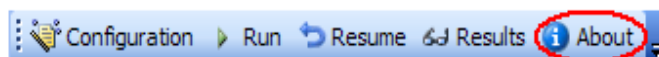
2.6.2 Uporaba programa GANetXL

Podrobne informacije o uporabi programa GANetXL so na voljo v priročniku [12], v nadaljevanju pa so na kratko predstavljene pomembnejše lastnosti programa.

Orodna vrstica

Po namestitvi in registraciji programa se pod zavihkom »dodatki« pojavi orodna vrstica, ki vsebuje pet gumbov:

- Configuration: omogoča dodatno nastavljanje genetskega algoritma,
- Run: sproži optimizacijski izračun,
- Resume: nadaljuje z ustavljenim izračunom,
- Result: prikaže Pareto rešitve in vrsto optimizacije,
- About: dodatne informacije o programu, licenci, roku licence in omejitvah.



Slika 20: Orodna vrstica

Konfiguracija

Okno »Configuration« ima tri zavihke: »Genetic Algorithm«, »Excel Link« in »Options«. Najpogostejše nastavitve in parametri so samodejno upoštevani, kar olajša uporabo programa za neizkušene uporabnike, sicer pa je to okno namenjeno dodatnemu nastavljanju genetskega algoritma, določanju alelov (vrednosti genov) v posameznih celicah, določanju kriterijev, itd.

Pod zavihkom »Genetic Algorithm« je šest dodatnih zavihkov, s katerimi določimo delovanje genetskega algoritma.

V zavihku »Type« izberemo vrsto optimizacije glede na število kriterijev (enokriterijska ali večkriterijska).

Velikost populacije določimo v zavihku »Population«. Večja kot je populacija, večja je raznolikost osebkov in zato tudi točnost rezultatov, vendar je za to potreben daljši čas računanja. Običajno zadoščajo velikosti populacije do 1000 osebkov.

Vrsto genetskega algoritma izberemo v zavihku »Algorithm«. Izbiramo lahko med štirimi različicami, od katerih večkriterijsko optimizacijo omogoča le NSGA-II.

V zavihku »Crossover« določimo vrsto rekombinacije. Z rezanjem in sestavljanjem delov kromosomov različnih osebkov se generira nove osebkove. V tem zavihku izberemo vrsto reza: rez na istem mestu za vse kromosome (Simple One Point) je najpreprostejši. Podoben, a malo zahtevnejši je rez na več mestih (Simple Multi Point). Najzahtevnejši je naključni rez po genih (Uniform Random), ki povzroči naključno razporeditev genetskega materiala po kromosomih novih osebkov.

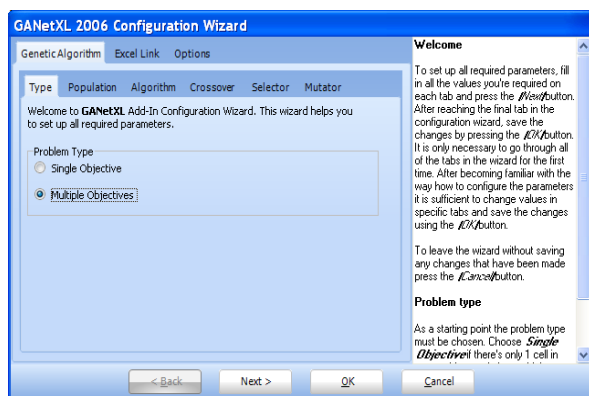
V zavihku »Selector« določimo ključ, po katerem so določene rešitve izbrane za naslednjo generacijo ali za modifikacijo z operatorji rekombinacije in mutacije. Za enokriterijsko optimizacijo so na voljo trije različni ključi (Roulette, Roulette by Rank in Tournament), za večkriterijsko optimizacijo pa samo eden (Crowded Tournament).

Zavihek »Mutator« nudi nastavitve operatorja mutacije, katerega naloga je zagotavljati raznolik (nov) genetski material med procesom optimizacije. S tem se poveča verjetnost, da dobimo globalni optimum namesto lokalnega. Izbiramo lahko med dvema operatorjema (»Simple«, ki v eni operaciji mutacije spremeni največ en gen v kromosomu, ter »Simple by Gene«, ki lahko v eni operaciji mutacije spremeni več genov).

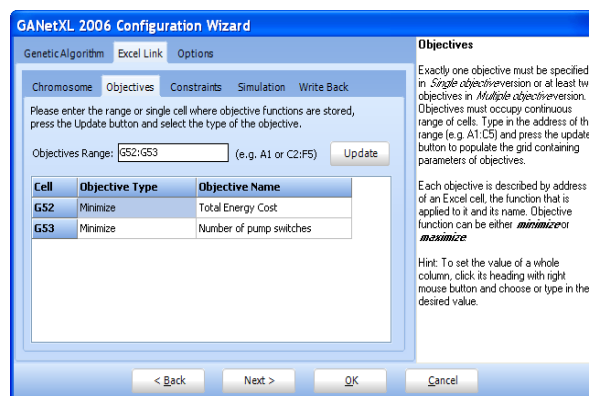
Pod zavihkom »Excel Link« določimo celice v Excelovem listu z vhodnimi podatki za genetski algoritem.

Odločitvene spremenljivke predstavljajo gene, vsi geni skupaj pa kromosom. V zavihku »Chromosome« določimo območje genov, to so celice odločitvenih spremenljivk (preberemo jih z gumbom »Update«), ki definirajo gene. To območje mora biti neprekinjeno. Določamo meje vrednosti genov ter ali gre za cela ali za realna števila.

V zavihku »Objective« določimo kriterije za optimizacijo (enega v primeru enokriterijske optimizacije in najmanj dva v primeru večkriterijske optimizacije). Enako kot geni morajo tudi kriteriji zavzemati neprekinjeno območje celic. Za vsak kriterij moramo podati naslov celice, kriterijsko funkcijo (minimizacija ali maksimizacija) ter ime kriterija.



Slika 21: Vrsta optimizacije glede na število kriterijev



Slika 22: Definiranje kriterijev optimizacije

Upoštevanje omejitev določimo v zavihku »Constraints«. Z njimi preprečimo, da bi spremenljivke zavzele vrednosti izven določenih meja tako, da se za spremenljivke izven meja določi penale. Formule za omejitve moramo vnesti ročno v Excel.

Program GANetXL omogoča uporabo zunanjega simulacijskega programa za ocenjevanje ustreznosti rešitev. Povezavo z zunanjim programom se ureja v zavihku »Simulation«.

V zavihku »Write Back« določimo celice, v katere se izpiše trenutna generacija in račun.

Pod zavihkom »Options« najdemo pet dodatnih zavihkov, v katerih nastavljamo potek računa (število generacij, število računov, vmesno shranjevanje,...).

Račun

Račun požemo z gumbom »Run« v orodni vrstici. Pred začetkom računanja se odpre okno, v katerega moramo vnesti ime lista, na katerega se bodo rezultati na koncu izpisali. Med izvajanjem lahko račun prekinemo z gumbom »Stop« in nadaljujemo z gumbom »Resume«.

Rezultati

Ko je račun izveden, se rezultati izpišejo v list, ki smo ga določili pred začetkom računanja. Na listu »Problem« se izpiše najboljša rešitev v primeru enokriterijske optimizacije ali Pareto

rešitve v primeru večkriterijske optimizacije. Z gumbom »Results« v orodni vrstici lahko odpremo okno, v katerem so rezultati grafično predstavljeni.

2.7 Pretvorba enot in umerjanje modela

Podatki za osnovni primer, iz katerega izhaja ta naloga, so podani v ameriških merskih enotah, ki so privzete v programu EPANet 2.0. V Sloveniji uporabljamo metrični sistem enot, zato vse količine pretvorimo v metrične. Zaradi večje preglednosti je v nadaljevanju primer v ameriških merskih enotah označen s *primer 1*, primer v metričnih merskih enotah pa s *primer 2*. Pred uporabo optimizacijskega programa GANetXL se moramo prepričati, da primer 2 resnično odraža primer 1. Majhna odstopanja lahko pričakujemo že zaradi (ne)natančnosti koeficientov pretvorbe, primera pa se razlikujeta tudi v uporabi enačb za določanje energijskih izgub. Primer 1 uporablja Hazen-Williamsovo enačbo in pripadajoči koeficient hrapavosti (C_{H-W}), primer 2 pa Darcy-Weisbachovo enačbo in tehnično hrapavost (ϵ), prek katere z enačbami (24) – (26) določi koeficient trenja (λ). Neposredne pretvorbe med H-W koeficientom hrapavosti in tehnično hrapavostjo ni, zato je postopek umerjanja primera 2 na primer 1 daljši.

3 OPTIMIZACIJA STROŠKOV ČRPANJA NA HIPOTETIČNEM PRIMERU

3.1 Opis primera

Vsi izračuni in opazovanja delovanja črpalk temeljijo na hipotetičnem primeru vodovodnega omrežja z 19 vozlišči in s 37 cevmi. Članek [10] zajema opis delovanja in uporabe programa GANetXL za določitev optimalne izrabe črpalk ter tudi hipotetični primer, ki je vzet za izhodišče te diplomske naloge. Cevi so linijski elementi, s katerimi distribuiramo vodo po omrežju, vozlišča pa točkovni elementi, v katerih se stikajo linijski elementi in prek katerih lahko voda vstopa v omrežje ali iz njega izstopa, zato lahko vozlišča obravnavamo kot porabnike. Poleg vozlišč in cevi omrežje tvorijo še nekateri drugi elementi. Glavni vir vode predstavlja rezervoar, iz katerega štiri črpalke poganjajo vodo po omrežju do porabnikov (vozlišč) in vodohrana. Iz vodohrana se po potrebi (ob viških porabe) dovaja voda v omrežje. Razporeditev elementov omrežja je prikazana na sliki 16. Obravnavamo primer enega dnevnega cikla, 24 ur, s časovnim korakom 1 ure.

Stroški črpalnega sistema predstavljajo znaten delež vseh stroškov obratovanja vodovodnega omrežja. Delimo jih v dve glavni skupini:

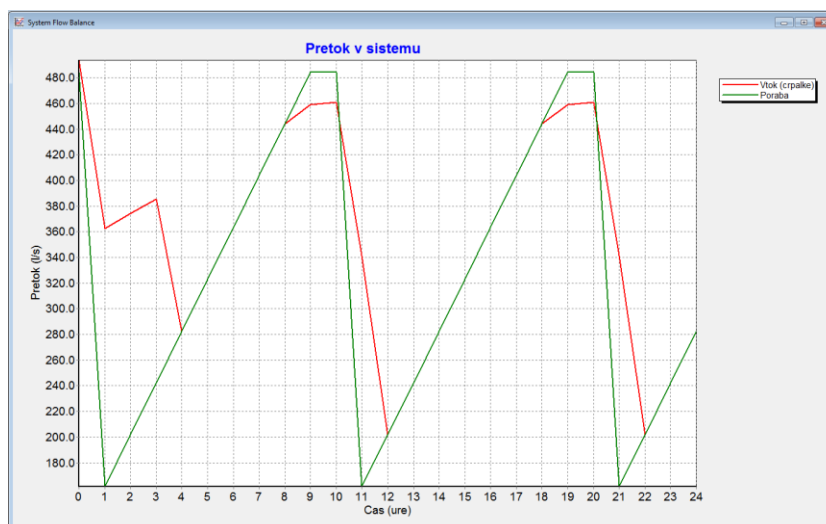
- 1 stroški obratovanja črpalk (obratovalni stroški) in
- 2 stroški vzdrževanja črpalk (vzdrževalni stroški).

Obratovalni stroški so odvisni od porabljene električne energije in so prisotni le v času, ko črpalke delujejo. Vzdrževalni stroški so povezani z obrabo črpalk, ta pa je odvisna od števila vklopov in izklopov črpalk v dnevnem ciklu.

Delovanje črpalk je podrejeno določenemu načrtu, ki vklop posamezne črpalke določa neposredno (dnevni urnik delovanja) ali posredno (glede na nivo vode v vodohranu) [13]. Ker delovanje sistema črpalk prek celega dnevnega cikla porabi veliko količino energije, lahko z izboljšanjem delovanja črpalk stroške črpalnega sistema znižamo. Najpogostejši ukrepi so:

- 1 uporaba vodohrana in kombiniranje delovanja črpalk: s črpalkami vodohran napolnimo v nočnem času (nižja tarifa električne energije) in iz njega po potrebi porabljamo vodo v dnevnem času – ob dnevnih viških porabe.
- 2 Izkoriščanje cenejše tarife električne energije: se navezuje na prejšnjo točko. Zaradi višje tarife električne energije zadostno količino vode ob dnevnih viških porabe delno zagotovimo z vodo iz vodohrana, preostali del pa s črpalkami. Na ta način črpalke porabijo manj energije, kar znižuje stroške obratovanja.
- 3 Minimiziranje preklopov črpalk: zaganjanje in ugašanje črpalk je eden od glavnih vzrokov visokih vzdrževalnih stroškov, zato je smotno, da črpalke po zagonu deluje čim dlje, oziroma da število preklopov črpalk čim bolj zmanjšamo.

Cilj te diplomske naloge je uskladiti delovanje štirih črpalk hipotetičnega primera tako, da so stroški črpalnega sistema čim manjši. To dosežemo s prej opisanimi ukrepi za zniževanje stroškov. Na sliki 23 je prikazan pretok v sistemu hipotetičnega primera. Rdeča črta predstavlja dotok – količino vode, ki jo v sistem prečrpamo s črpalkami, zelena črta pa predstavlja porabo. V prvih 4 urah črpamo več, kot zahteva poraba, zato v tem času polnimo vodohran. Dnevna viška porabe sta približno od 8. do 10. ure in od 18. do 20. ure. Na abscisi je prikazan čas (24 ur), na ordinati pa pretok v litrih na sekundo.



Slika 23: Pretok v sistemu

Minimiziranje stroškov porabljene električne energije in minimiziranje števila preklopov črpalk sta nasprotujoča si cilja; manj preklopov črpalk pomeni daljši čas obratovanja črpalk, torej večjo količino prečrpane vode ter zato tudi večje stroške porabljene energije. Pri določanju rešitev moramo med minimiziranjem porabljene energije in minimiziranjem preklopov črpalk iskati kompromise, zato je očitno, da ne obstaja ena sama in absolutno najboljša rešitev, temveč je optimalnih rešitev več.

Poleg tega je primer izrazito nelinearen zaradi naslednjih lastnosti:

- 1 hidravlične zakonitosti (črpalne krivulje in krivulje izkoristkov črpalk, energijske izgube), ki so povečini nelinearne,
- 2 vzorec porabe v dnevnem ciklu in
- 3 različne tarife električne energije v dnevnem ciklu.

Določanje optimalnih rešitev je tako zahtevno, da je potrebno uporabiti računalniški program, ki izvede optimizacijo.

3.2 Priprava in izpis podatkov

Za pretvorbo količin so bili uporabljeni koeficienti pretvorbe merskih enot (tabela je podana v prilogah B 1 in B 2). Brskalnik v EPANet 2.0 omogoča dostop po skupinah do vseh elementov (okno podatki o elementu), ki sestavljajo omrežje. Lastnosti elementov so bile pretvorjene v metrične enote, in sicer za vozlišča (nadmorska višina in osnovna poraba), cevi (dolžina, premer, tehnična hrapavost), rezervoar (energija, izražena v metrih vodnega stolpca) in vodohran (nadmorska višina, začetna gladina, najnižja gladina, najvišja gladina) ter črpalke (črpalna krivulja in krivulja izkoristka).

Node ID	Elevation ft	Base Demand GPM	Demand GPM	Head ft	Pressure psi
Junc 1	20	0	0.00	478.44	198.64
Junc 2	20	500	600.00	478.31	198.58
Junc 3	50	200	240.00	286.60	102.52
Junc 4	50	200	240.00	264.32	92.86
Junc 5	50	200	240.00	254.04	88.41
Junc 6	80	200	240.00	230.12	65.05
Junc 7	120	200	240.00	219.44	43.09
Junc 8	120	200	240.00	220.12	43.38
Junc 9	120	200	240.00	222.13	44.25
Junc 10	50	500	600.00	238.80	81.81
Junc 11	50	500	600.00	286.57	102.50
Junc 12	50	500	600.00	255.31	88.96
Junc 13	50	1000	1200.00	232.24	78.96
Junc 14	50	500	600.00	235.52	80.38
Junc 15	120	200	240.00	230.44	47.85
Junc 16	50	500	600.00	233.30	79.42
Junc 17	120	800	960.00	222.15	44.26
Junc 18	120	0	0.00	222.14	44.26
Junc 19	120	0	0.00	222.13	44.25
Resvr 20	10	#N/A	-7836.43	10.00	0.00
Tank 21	215	#N/A	156.43	222.00	3.03

Slika 24: Tabelarni izpis podatkov

Izbrane količine (poraba, energija in tlak za vozlišča ter pretok in hitrost za cevi) po skupinah za vse elemente in za izbran časovni korak s tabelarnim izpisom izvozimo v program za urejanje (npr. Excel) in postopek ponovimo za vseh 24 časovnih korakov. Te količine so rezultati izračuna primera 1. Z uporabo istih faktorjev konverzije, kot smo jih uporabili za pretvorbo lastnosti elementov pri primeru 2, izvožene podatke pretvorimo v metrične enote. Ti podatki (rezultati primera 1, pretvorjeni v metrične enote) predstavljajo osnovo, ki bo služila za umerjanje primera 2 (primer izpisov za nekaj vozlišč in pretvorba rezultatov v Excelu sta podana v prilogah B 3 in B4). Hrapavost cevi je v primeru 1 zajeta s koeficientom hrapavosti. Direktna pretvorba v tehnično hrapavost ne obstaja, zato so bile uporabljene tabele, ki podajajo koeficient hrapavosti in tehnično hrapavost za različne materiale. Za primerjalni material je bilo izbrano vlečeno jeklo (uncoated cast iron), oziroma koeficientu hrapavosti $C_{HW} = 130$ je bila pripisana tehnična hrapavost $\varepsilon = 0,226$ mm. V primeru 1 so vse cevi omrežja razdeljene v štiri kategorije, glede na C_{HW} : 70, 100, 120 in 130¹⁷. Manjkajoče

¹⁷ Večja vrednost C_{HW} pomeni, da je cev bolj gladka (manjša tehnična hrapavost).

vrednosti ε so bile dobljene z linearno interpolacijo (obe tabeli sta podani v prilogah B 5 in B 6):

Preglednica 4: Tehnične hrapavosti, pripadajoče različnim koeficientom hrapavosti

C_{HW}	70	100	120	130
ε [mm]	0,330	0,278	0,243	0,226

Program EPANet 2.0 omogoča tudi umerjanje modela glede na terenske meritve. Da lahko program prebere podatke, morajo biti le-ti zapisani v ustrezni obliki. To pomeni, da z urejevalnikom besedila (npr. beležnica) podatke o izbranih količinah preuredimo tako, da za vsak element (točkovni in linijski elementi posebej) zapišemo podatke posamezne količine za vse časovne korake (od 0:00 do 24:00). Točkovnim elementom pripadajo tri različne količine (poraba, energija in tlak), linijskim pa dve (pretok in hitrost). Podatke za vsako količino zapišemo v svojo datoteko, te pa kasneje uporabimo pri postopku umerjanja v EPANet 2.0. Datoteke vsebujejo veliko število podatkov, zato so zaradi večje preglednosti v prilogi B 7 le začetni deli datotek.

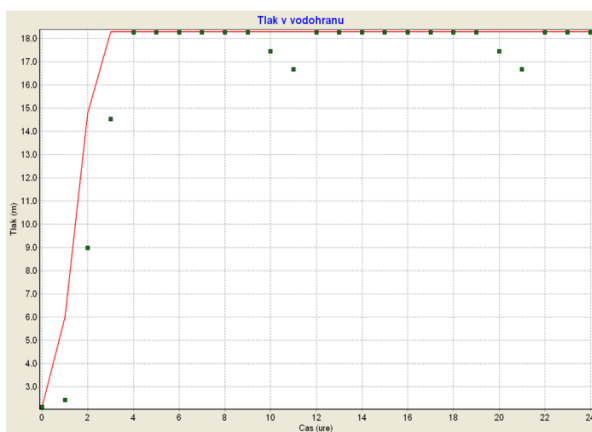
3.3 Umerjanje

Postopek umerjanja primerja srednje vrednosti meritev in izračunov programa na merilnih mestih. Ker so meritve posredni¹⁸ rezultati primera 1, izračuni pa temeljijo na primeru 2, dobimo za vsako merilno mesto 24 meritev (1 meritev v vsakem časovnem koraku). Srednje vrednosti 24 meritev za vsako merilno mesto so med seboj primerjane, iz česar razberemo, kako dobro se primer 2 ujema s primerom 1. Program primerja količine, ki smo jih zapisali v tekstovne datoteke: poraba, energija, tlak, pretok in hitrost. Okno »Calibration report« ima tri zavihke. V prvem, »Statistics«, je prikazana statistična obdelava podatkov, ki zajema srednje vrednosti merjenih in izračunanih količin, razliko med njimi, odstopanje RMS¹⁹ in korelacijo med merjeno in izračunano srednjo vrednostjo.

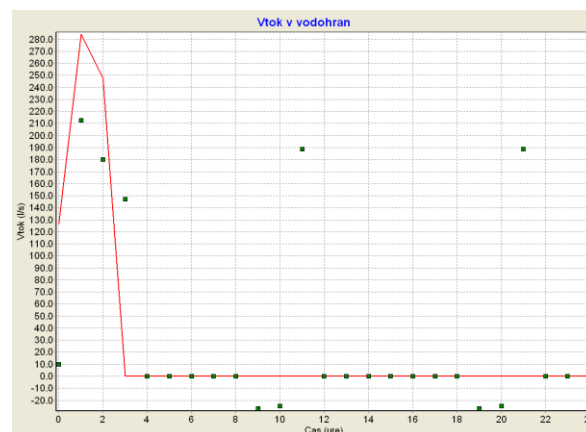
Na koncu program izračuna tudi skupni srednji vrednosti in korelacijo med njima. Izračunani tlaki v vozliščih so višji od merjenih (sliki 27 in 29; razlaga slik je na straneh 32 in 33). To pomeni, da so energijske izgube prenizke, torej je koeficient trenja (λ) premajhen. Le-ta pa se poveča, če se poveča tehnična hrapavost cevi. Da model še ni povsem reprezentativen nakazuje tudi to, da voda iz vodohrana po napolnitvi ne izteka (v 10. in 20. uri tlak v vodohranu ne pade), kar je posledica previsokih tlakov v omrežju (sliki 25 in 26). Zelene pike prikazujejo merjene vrednosti, rdeča črta pa izračunane vrednosti.

¹⁸ Rezultati so posredni zato, ker smo jih prav tako pridobili s pretvorbo enot (v Excelu). Za te rezultate privzamemo, da so »pravilni«, saj so povzeti po primeru 1, za katerega predpostavljamo, da je točen. Možna so manjša odstopanja zaradi nenatančnosti koeficientov pretvorbe.

¹⁹ Podobno standardni deviaciji.



Slika 25: Tlak v vodohranu



Slika 26: Vtok v vodohran

3.4 Usklajevanje koeficientov hrapavosti po spremembi merskega sistema

Ker primer 1 za določevanje energijskih izgub uporablja Hazen-Williamsovo enačbo in pripadajoči koeficient (C_{H-W}), primer 2 pa Darcy-Weisbachovo enačbo in tehnično hrapavost (ϵ), je potrebno tehnično hrapavost določiti tako, da bo primer 2 čim bolj reprezentativen.

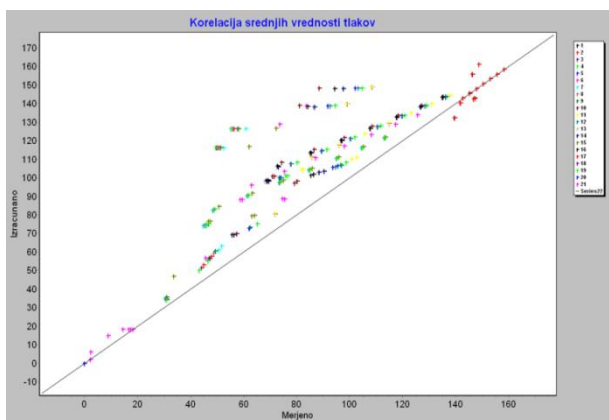
Tlak v ceveh torej znižujejo večje trenjske izgube, zato moramo tehnično hrapavost²⁰ za posamezne cevi popraviti tako, da se koeficient trenja izenači ali vsaj čim bolj približa koeficientu trenja v primeru 1. V oknu s podatki o elementu koeficient trenja predstavlja polje, označeno s »friction factor«.

EPANet 2.0 sicer omogoča tudi hkratno spreminjanje določenih lastnosti (v tem primeru pride v poštev tehnična hrapavost cevi) vsem ali samo izbranim elementom, vendar koeficient trenja (λ) ni enolično določen s koeficientom hrapavosti (C_{H-W}), saj enačba (15) velja le v območju turbulentnega režima toka Moodyjevega diagrama, ne pa tudi v prehodnem območju. Zato v primeru 1 cevi z enakim koeficientom hrapavosti nimajo enakega koeficienta trenja. V primeru 1 lahko cevi glede na vrednosti koeficienta hrapavosti razdelimo v štiri skupine, kot je opisano v poglavju 3.2.1. Glede na tako delitev lahko cevem v primeru 2 pripišemo različne oznake z vnosom v polje »tag« v oknu s podatki o elementu. Nato lahko z ukazom »group edit« hkrati spreminjamo tehnično hrapavost cevem z enako oznako (tag).

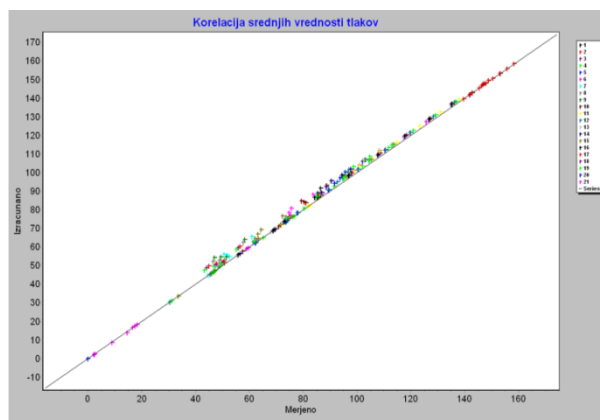
Najprej je bilo izvedeno ročno prilagajanje tehnične hrapavosti za vsako cev posebej²¹, kar rezultat precej izboljša. Tehnična hrapavost je bila za vsako cev posebej približno ocenjena glede na vrednosti tehnične hrapavosti, dobljene z linearno interpolacijo (glej preglednico 4) in s ponavljajočim izvajanjem hidravličnega preračuna ter z majhnimi popravki dodatno prilagojena; postopek bi lahko imenovali »ročna optimizacija«. Nekatera odstopanja so sicer še prisotna, vendar se karakteristike modela v primeru 2 zelo približajo primeru 1, kot je razvidno s spodnjih grafov.

²⁰ EPANet 2.0 v oknu s podatki o elementu za cevi s poljem »roughness« podaja koeficient hrapavost ali absolutno hrapavost, odvisno od izbire merskega sistema in nastavitve hidravlike (izbira enačbe za račun energijskih izgub).

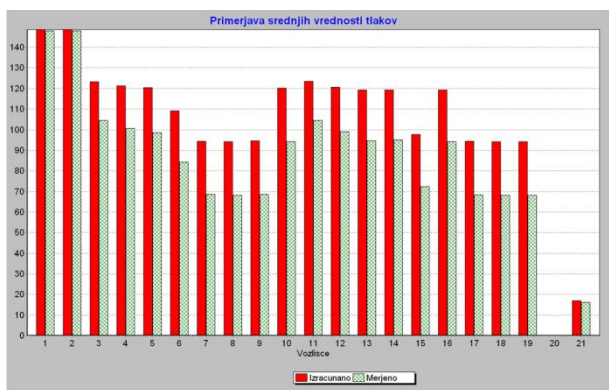
²¹ Alternativna rešitev je optimizacija (npr. z GANetXL).



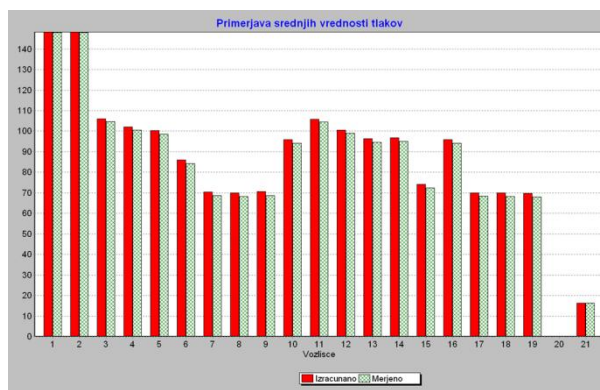
Slika 27: Korelacija srednjih vrednosti tlakov



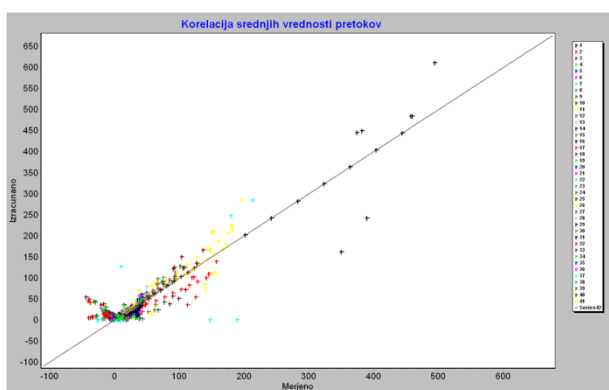
Slika 28: Korelacija srednjih vrednosti tlakov po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti



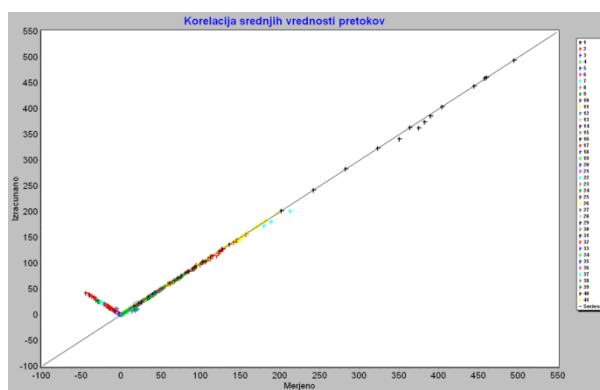
Slika 29: Primerjava srednjih vrednosti tlakov



Slika 30: Primerjava srednjih vrednosti tlakov po prilagajanju koeficientov hrapavosti



Slika 31: Korelacija srednjih vrednosti pretokov

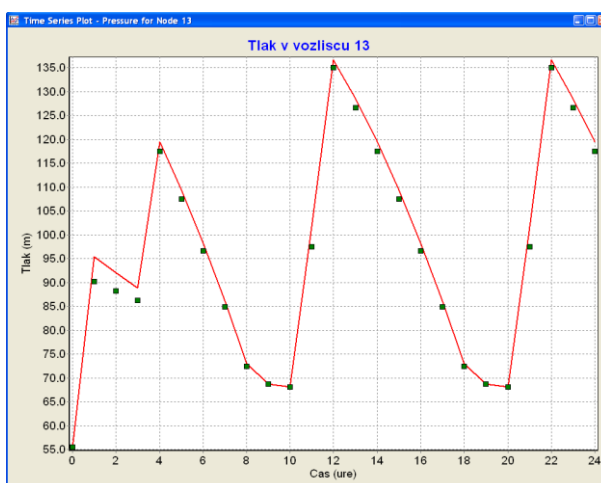


Slika 32: Korelacija srednjih vrednosti pretokov po prilagajanju koeficientov hrapavosti

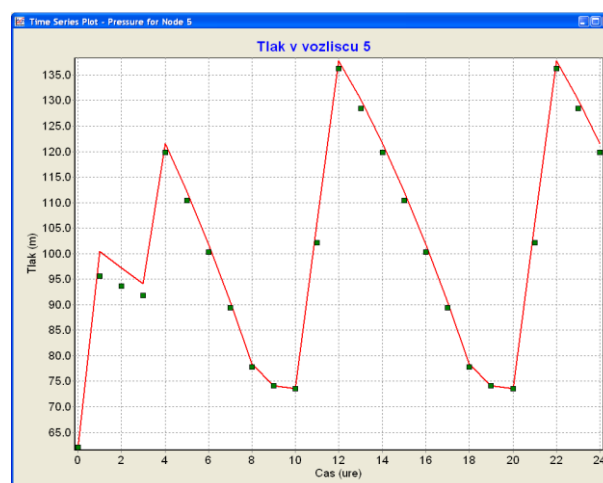
Primerjava slik 27 in 28 ter 29 in 30 pokaže, da po prilagajanju tehnične hrapavosti cevi tlak v sistemu pade in se približa merjenim vrednostim, vodohran pa služi svojemu namenu ob dnevnih višjih porabe od 8. do 10. ure in od 18. do 20. ure (slika 37). Zelene pike ali stolpci

predstavljajo merjene vrednosti, rdeče črte ali stolpci pa izračunane vrednosti. S slike 30 je razvidno, da so tudi po prilagajanju tehnične hrapavosti tlaki še malo previsoki, na vendar so ti rezultati bistveno bolj verodostojni v primerjavi z rezultati pred prilagajanjem tehnične hrapavosti. Sliki 31 in 32 pa prikazujeta korelacijo srednjih vrednosti pretokov pred in po prilagajanju tehnične hrapavosti cevi. Raztros je po prilagajanju bistveno manjši, kar potrjuje ugotovitve o izboljšanju reprezentativnosti modela. V delu grafa pri negativnih vrednostih meritev vidimo, da so izračunane vrednosti pozitivne, korelacija med obema spremenljivkama pa se torej približuje vrednosti -1. EPANet 2.0 upošteva tudi usmerjenost toka, zato negativna korelacija ne pomeni, da so rezultati napačni, temveč le to, da voda po nekaterih ceveh v primeru 2 teče v drugo smer kot v primeru 1.

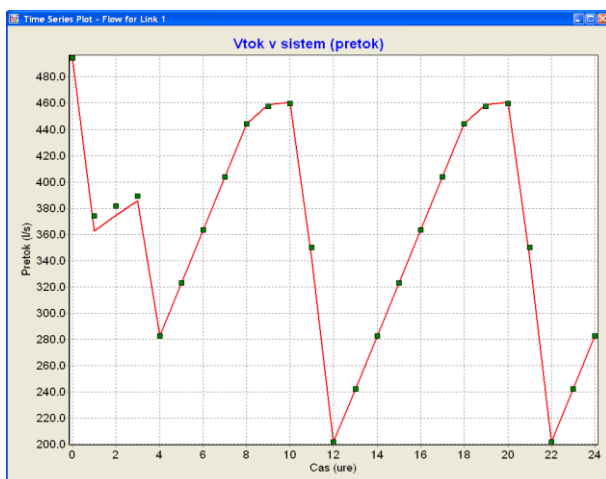
Slike od 33 do 38 prikazujejo tlak v vozliščih, pretok v ceveh in gladino ter pretok v vodohranu po ročnem prilagajanju tehnične hrapavosti. Zelene pike prikazujejo merjene vrednosti, rdeča črta pa izračunane vrednosti. Prikazana so opazovanja tlaka v vozliščih 13 (v sredini omrežja) in 5 (na robu omrežja), pretoka ob vstopu v omrežje in v naključno izbrani cevi 9 ter gladine in pretoka v vodohranu. Izračunane vrednosti se precej dobro ujemajo z merjenimi vrednostmi, torej je model že precej reprezentativen. Odstopanja so opazna pri tlaku v vozliščih, pri vtoku v sistem v urah 1 – 3, pri pretoku v cevi 9 in pri pretoku vodohrana pa v urah 1 – 3 ter 9 – 11 in 19 – 21.



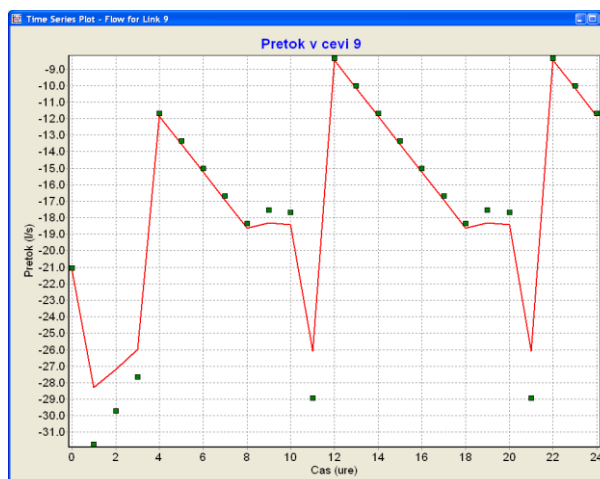
Slika 33: Tlak v vozlišču 13 po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti



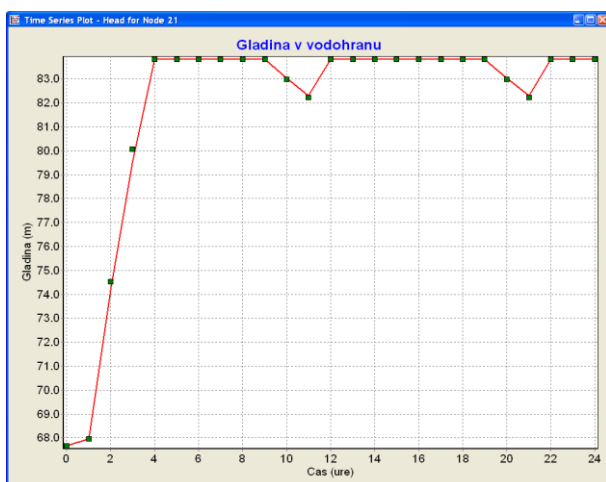
Slika 34: Tlak v vozlišču 5 po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti



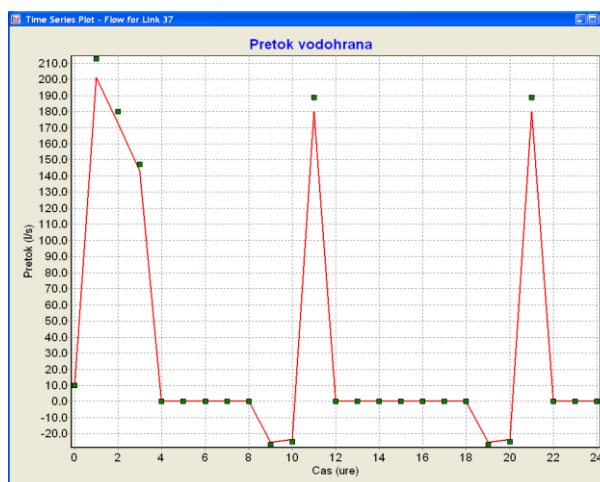
Slika 35: Vtok v sistem (pretok) po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti



Slika 36: Pretok v cevi 9 po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti

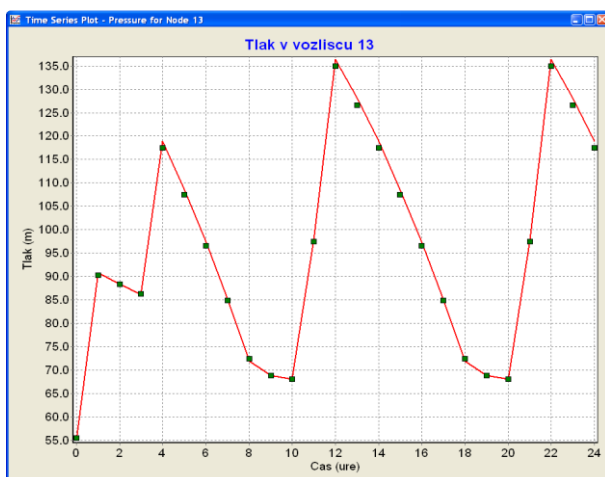


Slika 37: Gladina v vodohranu po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti

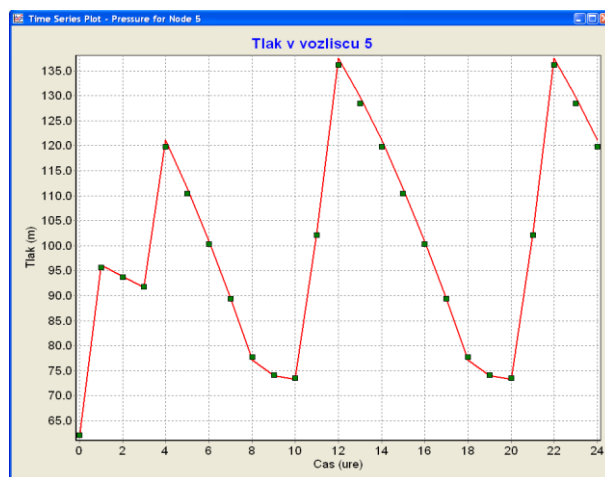


Slika 38: Pretok vodohrana po ročnem prilagajanju koeficientov hrapavosti

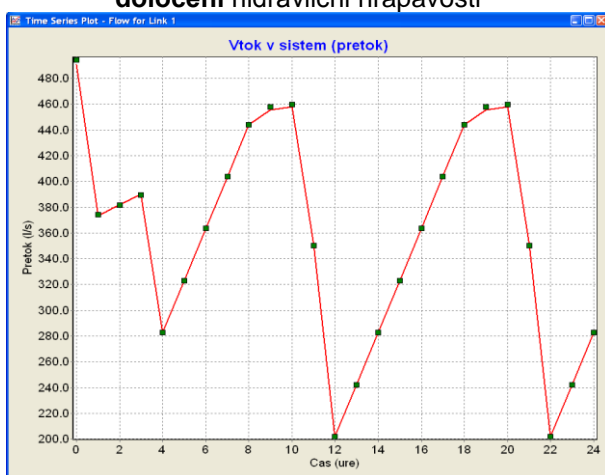
V nadaljevanju je bila tehnična hrapavost cevi določena še z uporabo optimizacijskega programa GANetXL. Postopek določevanja tehnične hrapavosti tako kot v prejšnjem primeru temelji na približanju izračunanih vrednosti izmerjenim vrednostim. Tokrat so bile določene štiri različne tehnične hrapavosti za štiri skupine, ki so bile cevem določene z orodjem »group edit«. Slike od 39 do 44 prikazujejo tlak v vozliščih, pretok v ceveh in gladino ter pretok v vodohranu po z optimizacijo določeni tehnični hrapavosti na istih mestih kot slike od 33 do 38.



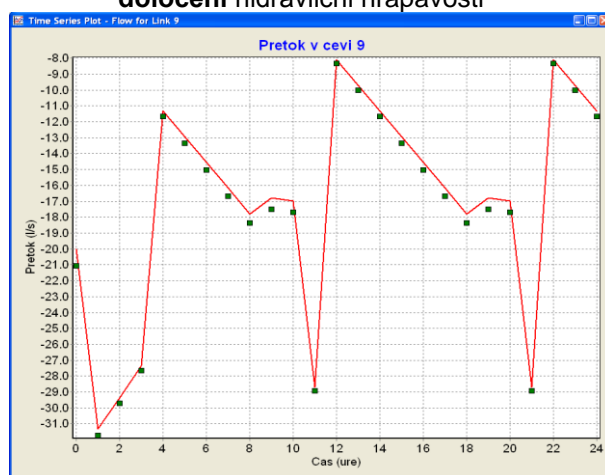
Slika 39: Tlak v vozlišču 13 po z optimizacijo določeni hidravlični hrapavosti



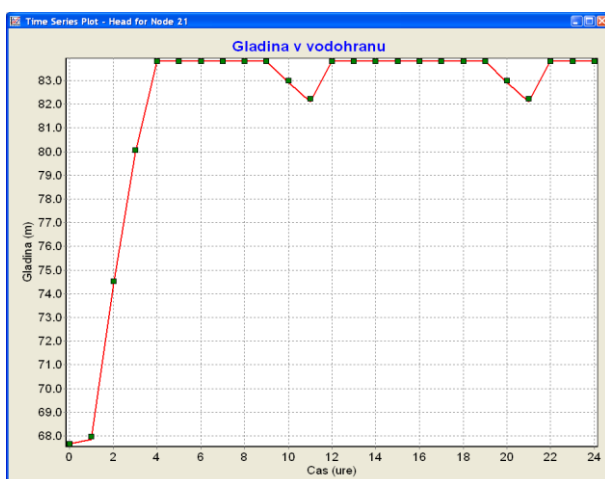
Slika 40: Tlak v vozlišču 5 po z optimizacijo določeni hidravlični hrapavosti



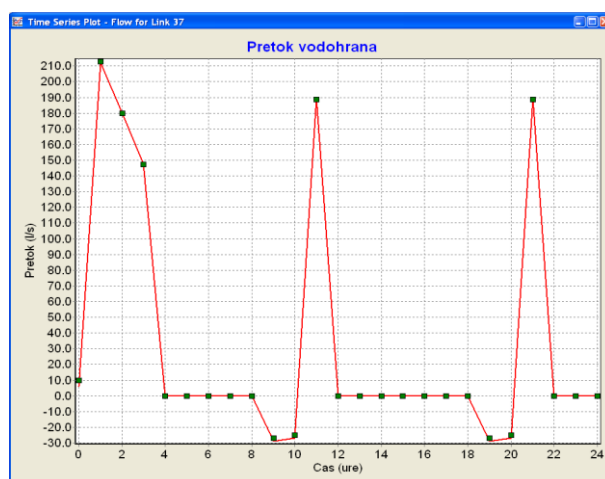
Slika 41: Vtok v sistem (pretok) po z optimizacijo določeni hidravlični hrapavosti



Slika 42: Pretok v cevi 9 po z optimizacijo določeni hidravlični hrapavosti



Slika 43: Gladina v vodohranu po z optimizacijo določeni hidravlični hrapavosti



Slika 44: Pretok vodohrana po z optimizacijo določeni hidravlični hrapavosti

Preglednica 5 vsebuje z optimizacijo določene hidravlične hrapavosti. Primerjava z ročno določenimi vrednostmi tehnične hrapavosti žal ni mogoča, saj so bile le-te določene za vsako cev posebej.

Preglednica 5: Z optimizacijo določene hidravlične hrapavosti

C_{HW}	70	100	120	130
ε [mm]	11,845	1,199	0,385	0,147

Rezultati so z uporabo teh vrednosti tehnične hrapavosti še nekoliko bolj točni kot po prvem popravljanju, zato je bil za optimizacijski račun uporabljen ta model.

3.5 Optimizacija stroškov črpanja

Hipotetični primer je zdaj pripravljen za analizo s programom GANetXL. Ta optimizacijski program generira naključne rešitve in jih ovrednoti glede na število kršitev postavljenih omejitev (penali). Ker primer 2 odraža primer 1, je merodajen za ovrednotenje nadaljnjih rešitev, dobljenih z optimizacijskim programom. V nasprotnem primeru (če po pretvorbi enot ne bi prilagajali še tehnične hrapavosti cevi) tega ne bi mogli trditi.

3.5.1 Stroški električne energije

V enem dnevnem ciklu stroški električne energije niso konstantni, ampak se spreminjajo s časom. Po večji tarifi (VT) se energija obračunava podnevi med 6. in 22. uro, po manjši tarifi (MT) pa ponoči med 22. in 6. uro. Kot je že bilo omenjeno v tej nalogi, se za polnjenje vodohrana izkorišča nočni čas, ko je tarifa manjša. V preglednici 6 so navedene nekatere vrednosti večje in manjše tarife različnih ponudnikov električne energije. Za potrebe te diplomske naloge sta bili, glede na vrednosti te preglednice, uporabljeni manjša tarifa (0,0541 €/kWh) in večja tarifa (0,0876 €/kWh).

Preglednica 6: Podražitve tarif dobaviteljev električne energije (povzeto po [14])

Dobavitelj	Cena VT 1. 7. 2011/1. 6. 2012 (€/kWh)	Povečanje VT (%)	Cena MT 1. 7. 2011/1. 6. 2012 (€/kWh)	Povečanje MT (%)
Elektro Celje energija	0,08264 / 0,08399	1,6	0,04165 / 0,05183	24,4
Elektro Maribor Energija plus	0,08568 / 0,08759	2,2	0,04405 / 0,05410	22,8
Elektro Gorenjska prodaja	0,07790 / 0,08759	12,4	0,04182 / 0,06047	44,5
E 3	0,08740 / 0,09089	3,9	0,04326 / 0,05620	29,9

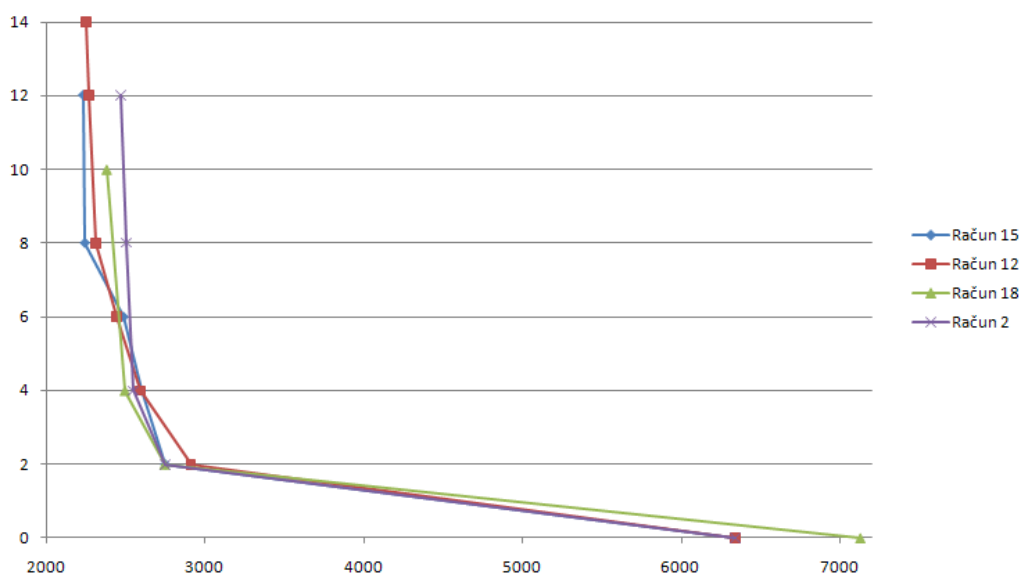
3.5.2 Parametri optimizacije z GANetXL

Pred iskanjem optimalnih rezultatov števila preklapov z optimizacijskim računom je potrebno določiti parametre optimizacije. Za izbor ustreznih vrednosti parametrov je bilo izvedenih več testnih računov, katerih parametri so zbrani v preglednici 7. Prva generacija je generirana naključno, glede na naključno izhodiščno število, ki ga določi računalnik. V programu GANetXL lahko to število določimo (»random seed value«), da je prva generacija vedno ista.

Na ta način lažje ovrednotimo in primerjamo parametre optimizacije. Vsi računi, prikazani v preglednici, so bili narejeni z istim izhodiščnim številom (1).

Preglednica 7: Optimizacijski parametri

Račun	Velikost populacije	Število generacij	Vrsta reza pri rekombinaciji	Verjetnost rekombinacije	Vrsta mutacije	Hitrost mutacije	RSV ²²
1	200	500	na več mestih	0,95	na genu	0,01	1
2	200	500	na enem mestu	0,95	na genu	0,01	1
3	200	500	na enem mestu	0,90	na genu	0,01	1
4	200	500	na enem mestu	0,80	na genu	0,01	1
5	200	500	na enem mestu	0,70	na genu	0,01	1
6	200	500	naključni rez	0,90	na genu	0,01	1
7	200	1000	na več mestih	0,95	na genu	0,01	1
8	200	1000	na enem mestu	0,95	na genu	0,01	1
9	300	500	na več mestih	0,95	na genu	0,01	1
10	300	1000	na več mestih	0,95	na genu	0,01	1
11	400	500	na več mestih	0,95	na genu	0,01	1
12	400	1000	na več mestih	0,95	na genu	0,01	1
13	400	1500	na več mestih	0,95	na genu	0,01	1
14	400	1000	na več mestih	0,95	na kromosomu	0,01	1
15	400	1000	na enem mestu	0,95	na genu	0,01	1
16	400	1000	naključni rez	0,95	na genu	0,01	1
17	400	1000	na enem mestu	0,50	na genu	0,01	1
18	400	1000	na enem mestu	0,95	na genu	0,015	1
19	400	1000	na enem mestu	0,95	na genu	0,02	1
20	400	1000	na enem mestu	0,95	na genu	0,11	1



Slika 45: Pareto fronte izbranih optimizacijskih računov

Na sliki 45 so prikazane Pareto fronte štirih računov, katerih rezultati so boljši od rezultatov ostalih računov. V preglednici 7 so ti računi v odebeljenem tisku. Pareto fronte teh štirih računov so si zelo blizu, v nekaterih točkah se celo prekrivajo²³, zato je smiselno izbrati tisti

²² Random seed value.

²³ Rezultati so diskretni, saj je eden od kriterijev optimizacije število vklopov in izklopov črpalk. Na Slika 45 so zaradi večje preglednosti te točke povezane.

račun, ki je porabil najmanj časa; čas računanja skrajšamo z zmanjšanjem velikosti populacije in števila generacij. Zaradi dobrih rezultatov in krajšega časa računanja so bili za končne optimizacijske račune izbrani parametri računa 2, ki jih podaja preglednica 8:

Preglednica 8: Izbrani optimizacijski parametri

<i>Račun</i>	<i>Velikost populacije</i>	<i>Število generacij</i>	<i>Vrsta reza pri rekombinaciji</i>	<i>Verjetnost rekombinacije</i>	<i>Vrsta mutacije</i>	<i>Hitrost mutacije</i>
2	200	500	na enem mestu	0,95	na genu	0,01

Povečanje velikosti populacije izboljša rezultate, saj račun upošteva večji nabor podatkov, vendar je zato čas računanja daljši. Prav tako izboljša rezultate tudi povečanje števila generacij, ker je posnemanje evolucijskih procesov (prenašanje boljših genov in izločanje slabših) daljše, povečanje obeh parametrov hkrati pa lahko bistveno podaljša čas računanja. Ob nenehnem izboljševanju zmogljivosti računalnikov se to ne zdi problematično, vendar je včasih boljša kakovost rezultatov ob daljšem času računanja nesprejemljiva ali nepotrebna.

Rekombinaciji z rezom na enem in več mestih dajeta podobne rezultate, rekombinacija z naključnimi rezi pa bistveno slabše rezultate, predvsem pri manjšem številu preklapov črpalk. 50% verjetnost rekombinacije v generaciji da slabše rezultate kot 95% verjetnost. Generiranje novih rešitev s pomočjo rekombinacije torej pomembno vpliva na kakovost rezultatov.

Pri mutaciji izbiramo vrsto in hitrost. Mutacija na kromosomu v eni operaciji spremeni vrednost največ enega gena, mutacija na genu pa lahko v eni operaciji spremeni vrednosti več genov. Hitrost mutacije določa, kolikokrat se bo ponovila mutacijska operacija v eni generaciji. Kromosom je v tem primeru sestavljen iz 96 genov: en gen predstavlja status posamezne izmed štirih črpalk (vklop ali izklop) v enem izmed 24 časovnih korakov. Verjetnost, da se z mutacijo spremeni vrednost enega gena v generaciji, je $1/96$, v programu GANetXL pa je izražena posredno, s t.i. hitrostjo mutacije (»mutation rate«), ki jo podamo v decimalnem zapisu. V povprečju se bo izvedla ena mutacija na generacijo, če hitrost mutacije nastavimo na vrednost med $1/96$ in $2/96$.

$$\frac{1}{96} = 0,01042, \quad (35)$$

zato hitrost mutacije pri vrednosti 0,01 predstavlja v povprečju manj kot eno mutacijo v generaciji. Hitrosti mutacije 0,015 in 0,02 predstavljata v povprečju 1 mutacijo v generaciji, hitrost 0,11 pa v povprečju 10 mutacij v generaciji.

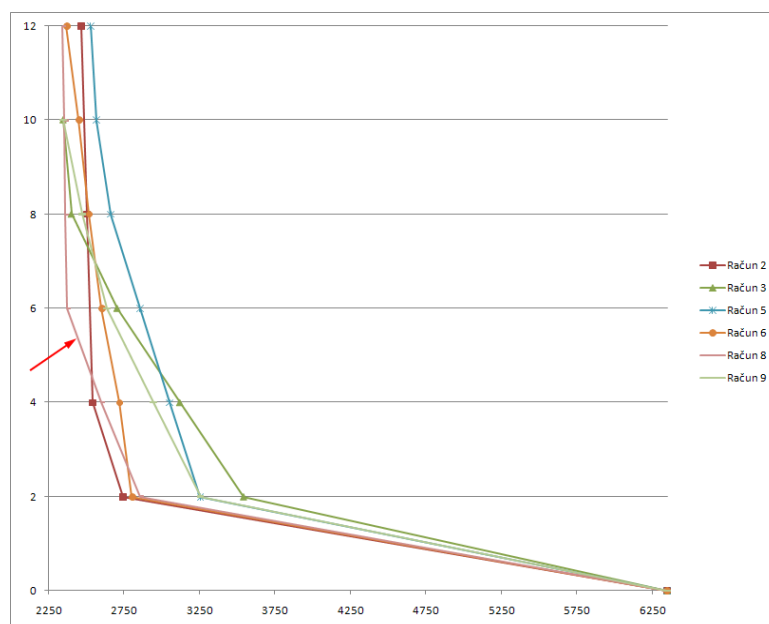
4 REZULTATI

4.1 Rezultati optimizacijskih računov

Izvedenih je bilo 12 optimizacijskih računov z enakimi parametri in z različnimi izhodiščnimi števili kot prikazuje preglednica 9. Rešitve teh optimizacijskih računov so t.i. »skoraj optimalne«, končni računi v nadaljevanju pa so bili opravljeni z istim izhodiščnim številom. Slika 46 prikazuje Pareto fronte le tistih računov, ki so dali boljše rezultate. Z rdečo puščico je označena Pareto fronta računa 8, ki je po moji oceni dala najboljše rezultate, pripadajoče izhodiščno število (RSV 7360320) pa je bilo v nadaljevanju uporabljeno za končne optimizacijske račune. Graf Pareto front vseh optimizacijskih računov je podan v prilogi B 8.

Preglednica 9: Rezultati optimizacijskih računov

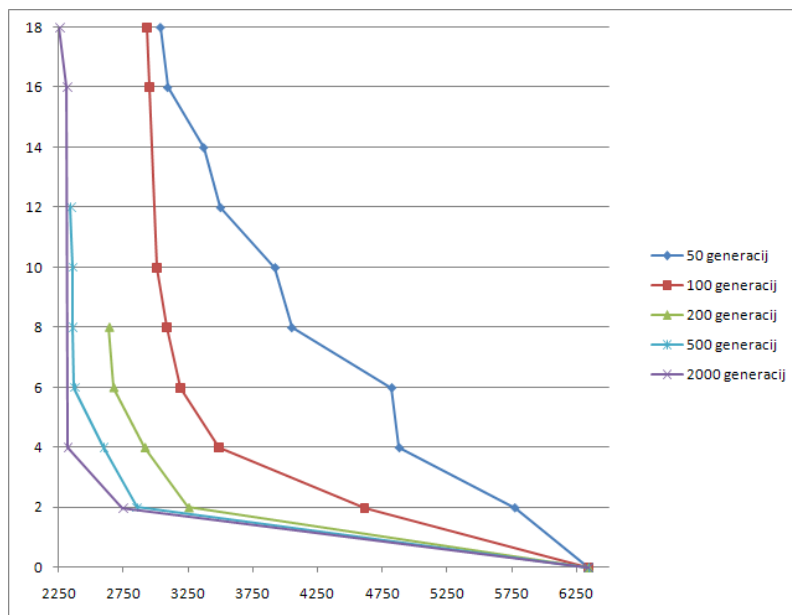
Račun	RSV	Strošek (€/dan)	Število preklpov
1	1427660	2528.48 - 6345.68	22 - 0
2	1	2468.63 - 6345.68	12 - 0
3	12705040	2345.41 - 6345.68	10 - 0
4	423078468	2468.63 - 6345.68	12 - 0
5	864555714	2411.00 - 6345.68	14 - 0
6	1014995064	2368.51 - 6345.68	12 - 0
7	3313101	2270.67 - 7134.54	12 - 0
8	7360320	2343.67	12
		2358.56	10
		2359.67	8
		2374.56	6
		2600.87	4
		2856.40	2
		6345.68	0
9	297524988	2347.73 - 6345.68	10 - 0
10	647613	2363.41 - 6345.68	18 - 0
11	20182526	2420.71 - 7134.54	14 - 0



Slika 46: Izbor skoraj optimalnih rešitev

4.2 Končni optimizacijski računi

Po določitvi ustreznih parametrov optimizacije in izhodiščnega števila, prikazanih v preglednici 10, je bilo izvedenih še 5 končnih optimizacijskih računov z različnim številom generacij. Pareto fronte teh računov so prikazane na sliki 47.



Slika 47: Končni optimizacijski računi

Preglednica 10: Končni optimizacijski parametri pri izbranem izhodiščnem številu

Velikost populacije	Število generacij	Vrsta reza pri rekombinaciji	Verjetnost rekombinacije	Vrsta mutacije	Hitrost mutacije	RSV
200	50, 100, 200, 500, 2000	na enem mestu	0,95	na genu	0,01	7360320

4.3 Analiza rezultatov

Račun s 500 generacijami da opazno boljše rezultate kot računa z 200 ali s 100 generacijami, čas računanja pa ni pretirano dolg²⁴. Obenem so rezultati računa z 2000 generacijami zelo podobni rezultatom računa s 500 generacijami, čas računanja pa je kar štirikrat daljši, zato ima račun s 500 generacijami najboljše razmerje med kvaliteto rezultatov in časom računanja. Ob upoštevanju prej izbranih optimizacijskih parametrov in izhodiščnega števila so rezultati računa s 500 generacijami optimalni. Rezultati tega računa so v odebeljenem tisku podani že v preglednici 9 pod oznako »Račun 8«.

Z večanjem števila generacij se zastrujejo tudi omejitve, na podlagi katerih program izbira rešitve, zato račun s 50 generacijami ponudi rešitve za vsa soda števila preklpov črpalk od 0 do 18, račun z 2000 generacijami pa le za 0, 2, 4, 16 in 18 preklpov črpalk. Račun s 500

²⁴ Odvisen je od zmogljivosti računalnika; pri računalniku srednje zmogljivosti (dvojedni procesor s hitrostjo 1.83 GHz, 2 GB RAM) je čas računanja približno 8 minut.

generacijami da rešitve za 0, 2, 4, 6, 8, 10 in 12 preklopov črpalk, izmed katerih pa lahko izbor še zožamo. Na sliki 47 se vidi, da je točka z nič preklopi po abscisi precej oddaljena od ostalih točk, obratovalni stroški pa so skoraj trikrat večji od tistih pri 2 preklopi. Podobno so po ordinati precej oddaljene tudi točke za 8, 10 in 12 preklopov, ki pa v primerjavi s točko za 6 preklopov dnevne obratovalne stroške znižajo največ za dober odstotek:

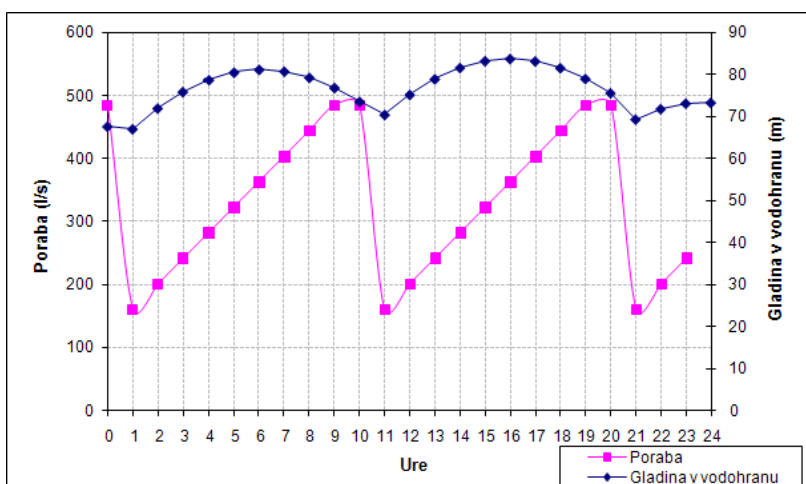
$$\frac{2374,56 - 2343,67}{2374,56} \cong 0,013 = 1,3 \% . \quad (36)$$

S povečanjem števila preklopov s 6 na 12 se povečajo vzdrževalni stroški črpalk, zato je smiselnost 1,3 % znižanja obratovalnih stroškov na račun povečanja števila preklopov vprašljiva. Bolj realne in sprejemljive rezultate najverjetneje dajejo rešitve za 2, 4 in 6 preklopov.

Preglednica 11: Optimalne rešitve

Strošek (€/dan)	Število preklopov
2374.56	6
2600.87	4
2856.40	2

Program GANetXL za vsako možno rešitev poda rezultate²⁵ v tabelah in s pomočjo pomožnih grafov. Prikazani so grafi in tabele za rešitev z 2 prekloma, grafi in tabele za rešitvi s 4 in s 6 preklopi pa so v prilogah od B 9 do B 18.

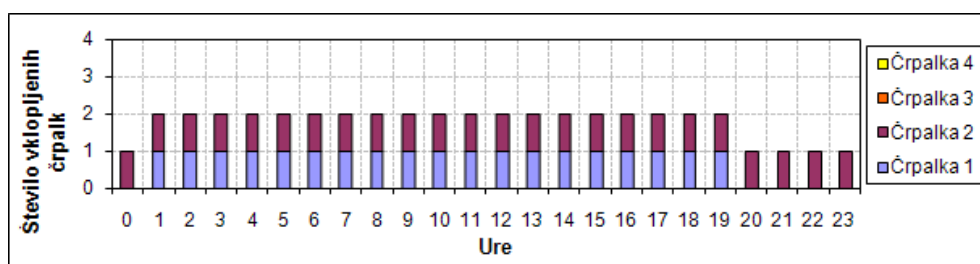


Slika 48: Graf porabe in gladine v vodohranu (2 preklopa črpalk)

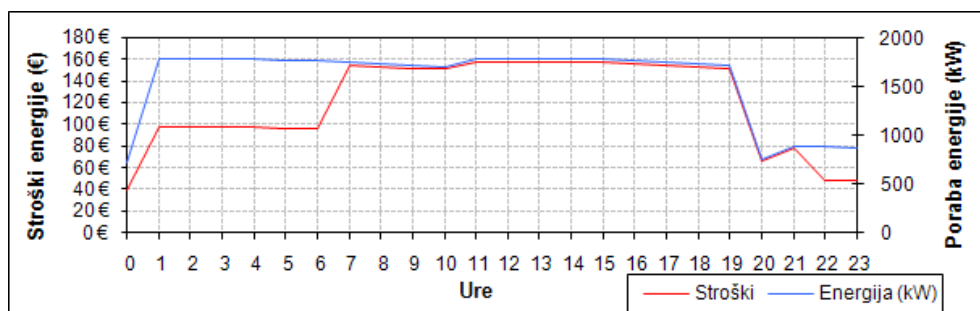
Napaka	0
Kriterija	2
Strošek energije (€/dan)	2,856.4
Število preklopov črpalk	2.0
Penali	0
Omejitve	
Najmanjša gladina v vodohranu	
Največja gladina v vodohranu	
Gladina v vodohranu ob koncu dneva	0.00
Penali	0.00

Slika 49: Prikaz rezultatov in kršenja omejitev (2 preklopa črpalk)

²⁵ Vklopi in izklopi črpalk, količina in stroški porabljene energije, kršenje omejitev.



Slika 50: Prikaz vklopljenih črpalk (2 preklopa črpalk)



Slika 51: Urni stroški in poraba energije (2 preklopa črpalk)

Čas dneva (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Strošek električne energije (€/kWh)	0.0541	0.0541	0.0541	0.0541	0.0541	0.0541	0.0541	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876

Odločitvene spremenljivke

Črpalka 1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Črpalka 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Črpalka 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Črpalka 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Izhodni podatki

Gladina v vodohranu	67.67	67.06	72.01	75.92	78.77	80.55	81.23	80.81	79.33	76.89	73.59
Iztok iz rezervoarja	-289.13	-322.02	-328.66	-334.83	-340.50	-345.08	-349.59	-355.78	-365.08	-377.61	-383.04
Poraba	484.52	161.51	201.88	242.26	282.64	323.01	363.39	403.77	444.14	484.52	484.52
Poraba energije črpalka 1 (kW)	0.0	754.7	762.2	769.2	775.2	776.2	776.3	776.0	775.1	772.6	771.1
Poraba energije črpalka 2 (kW)	721.1	1032.9	1023.6	1014.4	1006.0	997.1	987.9	975.4	956.4	944.7	942.2
Poraba energije črpalka 3 (kW)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Poraba energije črpalka 4 (kW)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Strošek energije črpalka 1 (€/h)	0.00 €	40.83 €	41.24 €	41.61 €	41.94 €	41.99 €	42.00 €	67.98 €	67.90 €	67.68 €	67.55 €
Strošek energije črpalka 2 (€/h)	39.01 €	55.88 €	55.37 €	54.88 €	54.43 €	53.94 €	53.45 €	85.44 €	83.78 €	82.76 €	82.54 €
Strošek energije črpalka 3 (€/h)	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €
Strošek energije črpalka 4 (€/h)	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €

Slika 52: Tabela odločitvenih spremenljivk in izhodnih podatkov – izpis v programu GANetXL (2 preklopa črpalk)

V obravnavanem primeru ne rabimo vseh štirih črpalk, saj hkrati delujejo največ tri črpalke (0 preklopov črpalk) ali le dve z različnimi kombinacijami vklopov in izklopov (2, 4, 6, 8, 10 in 12 preklopov črpalk), četrta črpalka pa ni nikoli uporabljena. Iz tega podatka lahko sklepamo, da sistem največ treh črpalk deluje z večjim izkoristkom kot sistem vseh štirih črpalk, torej so pretoki premajhni za delovanje štirih črpalk, oziroma je moč črpalk prevelika. Z izbiro šibkejših črpalk bi lahko z večjim izkoristkom izrabljali vse štiri črpalke hkrati.

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0541	0.0541	0

1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

70.47	75.24	78.99	81.68	83.29	83.82	83.24	81.62	79.06	75.65	69.37	71.85	73.19	73.36
-316.49	-323.33	-329.44	-334.99	-339.99	-344.74	-351.27	-361.08	-374.05	-280.58	-242.14	-245.21	-247.68	-250.61
161.51	201.88	242.26	282.64	323.01	363.39	403.77	444.14	484.52	484.52	161.51	201.88	242.26	282.64

749.0	756.0	763.1	769.4	774.7	776.2	776.2	775.6	773.4	0.0	0.0	0.0	0.0	
1039.5	1031.3	1022.4	1014.2	1006.8	997.8	984.5	964.6	946.2	758.5	889.1	882.8	877.5	870.98
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

65.61 €	66.22 €	66.85 €	67.40 €	67.86 €	67.99 €	68.00 €	67.94 €	67.75 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €
91.06 €	90.34 €	89.56 €	88.84 €	88.19 €	87.41 €	86.24 €	84.50 €	82.89 €	66.44 €	77.89 €	47.76 €	47.47 €	0.00 €
0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €
0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €

Slika 53: Tabela odločitvenih spremenljivk in izhodnih podatkov – izpis v programu GANetXL (2 preklopa črpalk) (nadaljevanje)

Zaradi nelinearnosti problema je težko oceniti rezultate ob drugačnih pogojih, vendar je očitno, da je izbira črpalk glede na zahtevane pretoke in tlake v omrežju ključnega pomena. Prešibke ali premočne črpalke porabljajo preveč električne energije, zato lahko bistveno zvišajo stroške. Toda ob spreminjajočih se pogojih v vodovodnem omrežju se morajo črpalke prilagajati in nesmiselno bi bilo pričakovati, da bi lahko ves čas obratovale z visokim izkoristkom. Črpalke s spremenljivo hitrostjo bi te težave ublažile, vendar ta vidik v nalogi ni bil obravnavan. Poleg tega tudi niso bili neposredno obravnavani vzdrževalni stroški črpalnega sistema, zato ni bilo mogoče izvesti celostne primerjave rešitev. Tak primer sta rešitvi s 4 in 6 preklopi, saj je relativni delež povečanja²⁶ preklapov visok, relativni delež znižanja obratovalnih stroškov pa nizek (enačbi 37 in 38). Brez poznane vzročnosti med povečanjem števila preklapov črpalk in povečanjem vzdrževalnih stroškov črpalk pa ne moremo določiti, ali se skupni stroški²⁷ povečajo ali zmanjšajo.

$$\frac{|4-6|}{4} = 0,50 \quad (37)$$

$$\frac{2600,87-2374,56}{2600,87} \cong 0,087 \quad (38)$$

Zaradi višje tarife električne energije so obratovalni stroški črpalk podnevi (med 6. in 22. uro) višji kot ponoči (med 22. in 6. uro). Z vidika zmanjševanja obratovalnih stroškov je smiselno, da črpalke delujejo s čim večjim izkoristkom; črpalka deluje z največjim izkoristkom, če črpa pri ustreznem pretoku. Po potrebi je torej treba vklopiti dodatne črpalke ali izklopiti že delujoče črpalke, da dobljeni sistem črpalk deluje s čim večjim izkoristkom, saj je takrat razmerje med porabljeno energijo in prečrpano količino vode najugodnejše. Z vidika zmanjševanja vzdrževalnih stroškov pa je najboljšo neprestano izkoriščati črpalke, torej da izklopov po začetnem zagonu črpalk sploh ni. Obeh vrst stroškov ne moremo hkrati znižati, zato je potrebno primerjati optimalne rešitve. Ker vzdrževalni stroški v tem primeru niso neposredno določeni, optimizacija celotnih stroškov ni bila možna.

²⁶ V primeru, da število preklapov črpalk povečamo s 4 na 6.

²⁷ Vsota obratovalnih in vzdrževalnih stroškov črpalk.

5 ZAKLJUČEK

Črpalni sistemi porabljajo velik del skupne potrebne energije in predstavljajo znaten delež vseh stroškov v vodovodnih omrežjih. Z optimizacijo delovanja črpalnega sistema lahko v daljšem časovnem obdobju veliko privarčujemo, zato so taki ukrepi za izboljšanje lastnosti in gospodarne izrabe vodovodnega omrežja smiselni in povsem upravičeni. Pri tem sta izbira moči in urnik obratovanja črpalk ključnega pomena, za učinkovito optimizacijo sistema pa moramo upoštevati še številne druge dejavnike (spreminjanje porabe in tarife električne energije v daljših časovnih obdobjih, popravila na omrežju in zamenjava posameznih elementov, merilne napake itd.).

S programom GANetXL so bili izvedeni testni računi ter končni optimizacijski računi. Testni računi so služili nastavljanju programa, t.j. izboru parametrov optimizacije, s končnimi optimizacijskimi računi pa je bilo za izbran primer določeno število generacij, ki je še primerno glede na čas računanja; večje število generacij namreč bistveno podaljša čas računanja. Program je določil rešitve z različnimi števili preklpov in, glede na določeni tarifi električne energije, pripadajoče obratovalne stroške. Rešitve so v grafični podane v obliki Pareto front. Rezultati kažejo, da se s povečanjem prostora, v katerem program išče rešitve (večanje populacije in števila generacij), le-te izboljšajo, vendar se podaljša tudi čas računanja. Izmed končnih optimizacijskih računov je bil izbran račun z najboljšim razmerjem med kvaliteto rezultatov in časom računanja

Poleg raziskovanja povezave med številom preklpov črpalk ter obratovalnimi stroški črpalk bi bilo v nadaljevanju zanimivo raziskati tudi povezavo med številom preklpov črpalk in vzdrževalnimi stroški črpalk. Z večanjem števila vklopov in izklopov črpalk se namreč obratovalni stroški nižajo, vzdrževalni stroški pa višajo, zato bi le tako lahko natančno določili znižanje ali zvišanje skupnih stroškov.

VIRI

- [1] Sketelj, J. 1957. Hidravlični preračun vodovodnega omrežja. Ljubljana, Uprava za vodno gospodarstvo LRS: 114 str.
- [2] Steinman, F. 2010. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 294 str.
- [3] Walski, T. M., Chase, D. V., Savić, D. A. et al. 2003. Advanced Water Distribution Modelling And Management. Waterbury, CT, Haestad Methods: 800 str.
- [4] Panjan, J. 2002. Osnove zdravstveno hidrotehnične infrastructure: vodovod in čiščenje pitnih voda, odvodnjavanje in čiščenje onesnaženih voda in komunalni odpadki. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 289 str.
- [5] Evans, J. 2013. Centrifugal Pump Efficiency – What, How, Why, When? Pump-flo An Engineered Software Business.
<http://pump-flo.com/pump-library/pump-library-archive/joe-evans,-phd/centrifugal-pump-efficiency---what,-how,-why,-when.aspx> (Pridobljeno 5. 5. 2013.)
- [6] 2013. Pumping Systems: Parallel and Series Configurations. McGraw-Hill.
<http://highered.mcgraw-hill.com/sites/dl/free/0072402172/62806/ChXlc.pdf>
(Pridobljeno 27. 3. 2013.)
- [7] McNally, B. 2013. Series And Parallel Operation Of Cetrifugal Pumps 18-1. McNally Institute.
<http://www.mcnallyinstitute.com/18-html/18-1.htm> (Pridobljeno 27. 3. 2013.)
- [8] Rossman, L. A. 2000. Epanet 2 Users Manual. Cincinnati, Environmental Protection Agency: 200 str.
- [9] Olariu, S. (ur.), Zomaya, A. Y. (ur.). 2006. Handbook of Bioinspired Algorithms and Applications. Boca Raton, Chapman & Hall/CRC: 679 str.
- [10] Savić, D. A., Bicik, J., Morley, M. S. 2011. A DSS Generator for Multiobjective Optimization of Spreadsheet-Based Models. Environmental Modelling and Software: 551-561.
- [11] Caramia, M., Dell’Olmo, P. 2008. Multi-objective Management in Freight Logistics: increasing capacity, service level and safety with optimization algorithms. Springer: 11-36.
http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&sqi=2&ved=0CEMQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.springer.com%2Fcda%2Fcontent%2Fdocument%2Fcda_downloaddocument%2F9781848003811-c1.pdf%3FSGWID%3D0-0-45-

[604820-p173829727&ei=vhhTUY6HJsIdO96ggOqF&usq=AFQjCNGk4-yOLX2cyi4Hdg8GRYkZQI3yHA&cad=rja](https://doi.org/10.1080/10807014.2013.781111) (Pridobljeno 27. 3. 2013).

- [12] Bicik, J. 2011. GANetXL – User Manual. University of Exeter, Centre for Water Systems: 33 str.
<http://emps.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/schoolofengineeringmathematicsandphysicalsciences/research/cws/downloads/manual-2011.pdf>
(Pridobljeno 27. 3. 2013.)
- [13] López-Ibáñez, M., Prasad, D., Paechter, B. 2008. Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks. Journal of Water Resources Planning and Management: 337-346.
- [14] Podražitve tarif iz osnovne ponudbe ponudnikov električne energije. 2013. Zveza potrošnikov Slovenije.
http://www.zps.si/images/stories/okolje/energija/cene_el_energije_tab_podrazitve.pdf
(Pridobljeno 16. 3. 2013.)
- [15] Conversion Tables. 2013.
<http://www.chiwater.com/files/ConversionTables.pdf> (Pridobljeno 12. 3. 2013.)

SEZNAM PRILOG

Priloga A 1: Mrežasti sistem cevovodnega omrežja

Priloga A 2: Krožni sistem cevovodnega omrežja

Priloga A 3: Moodyjev diagram

Priloga A 4: Tritočkovna črpalna krivulja

Priloga A 5: Večtočkovna črpalna krivulja

Priloga A 6: Črpalne krivulje črpalke s spremenljivo hitrostjo

Priloga B 1: Tabela koeficientov pretvorbe med merskimi sistemi

Priloga B 2: Tabela koeficientov pretvorbe med merskimi sistemi – nadaljevanje

Priloga B 3: Izpis podatkov iz EPANet 2.0 in prenos v Excel – pretvorba v SI merski sistem

Priloga B 4: Izpis podatkov iz EPANet 2.0 in prenos v Excel – pretvorba enot

Priloga B 5: Tabela koeficientov hrapavosti C po Hazen-Williamsu

Priloga B 6: Tabela nadomestne velikosti peščenih zrn za opis tehnične hrapavosti

Priloga B 7: Datoteke s podatki za umerjanje

Priloga B 8: Pareto fronte vseh optimizacijskih računov

Priloga B 9: Graf porabe in gladine v vodohranu (4 preklopi črpalk)

Priloga B 10: Prikaz vklopljenih črpalk (4 preklopi črpalk)

Priloga B 11: Urni stroški in poraba energije (4 preklopi črpalk)

Priloga B 12: Tabela odločitvenih spremenljivk in izhodnih podatkov – izpis v programu
GANetXL (4 preklopi črpalk)

Priloga B 13: Tabela odločitvenih spremenljivk in izhodnih podatkov – izpis v programu
GANetXL (4 preklopi črpalk) (nadaljevanje)

Priloga B 14: Graf porabe in gladine v vodohranu (6 preklopov črpalk)

Priloga B 15: Prikaz vklopljenih črpalk (6 preklopov črpalk)

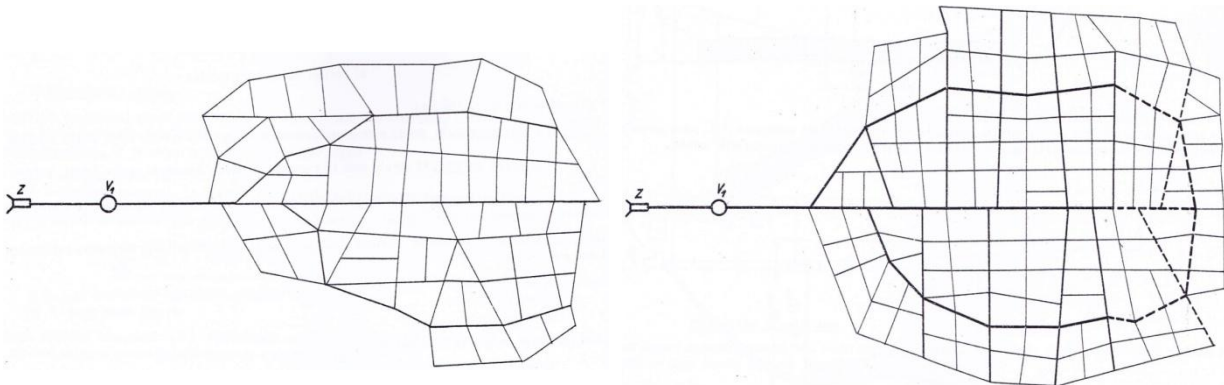
Priloga B 16: Urni stroški in poraba energije (6 preklopov črpalk)

Priloga B 17: Tabela odločitvenih spremenljivk in izhodnih podatkov – izpis v programu
GANetXL (6 preklopov črpalk)

Priloga B 18: Tabela odločitvenih spremenljivk in izhodnih podatkov – izpis v programu
GANetXL (6 preklopov črpalk) (nadaljevanje)

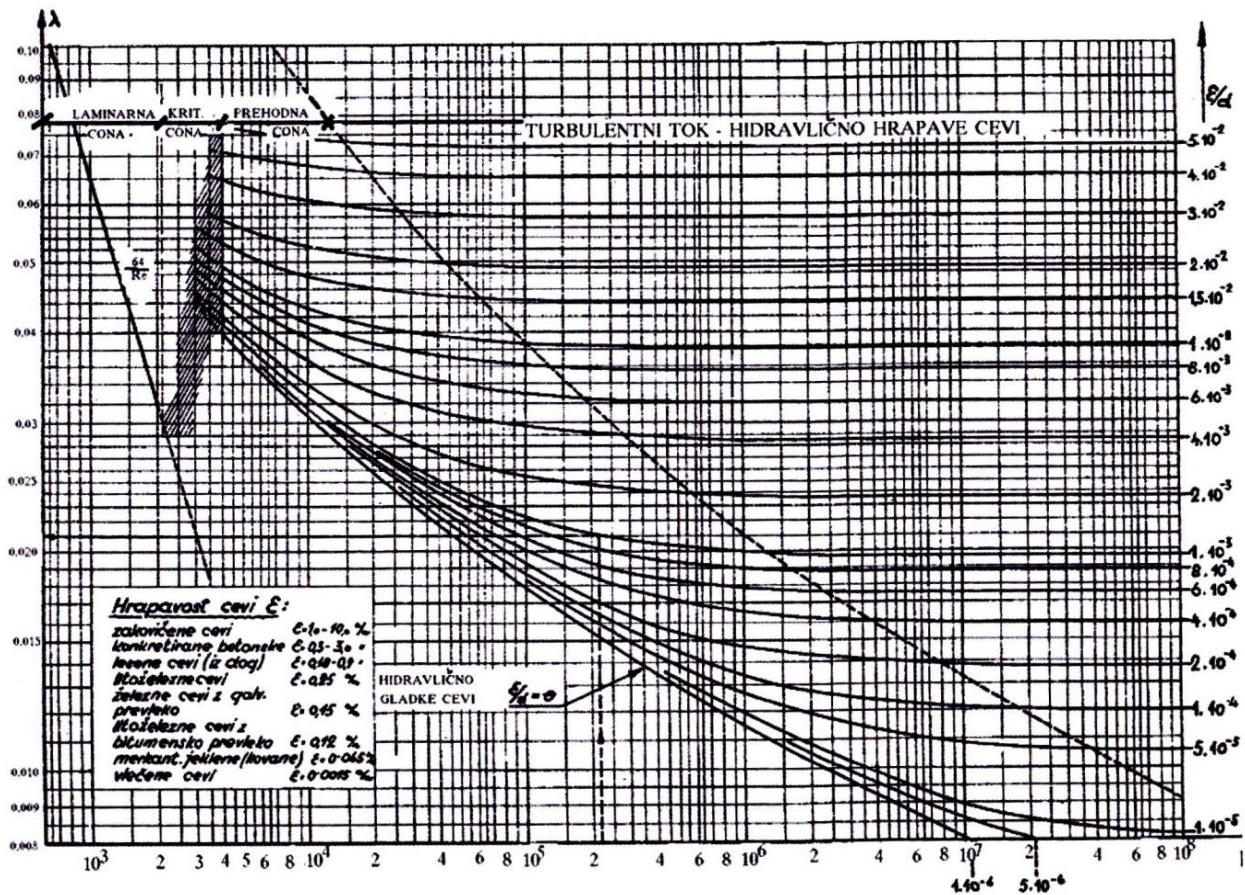
PRILOGE

A Priloge teoretičnega pregleda hidravličnih zakonitosti

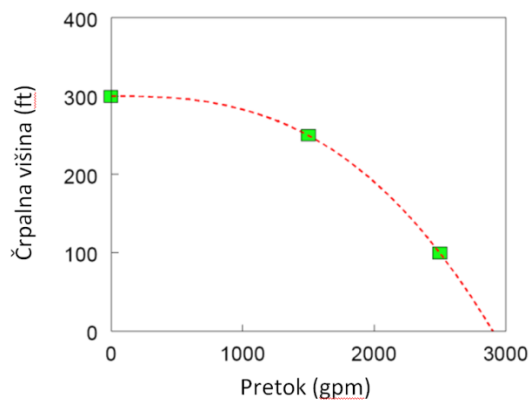


Priloga A 1: Mrežasti sistem vodovodnega omrežja
(Sketelj, 1957, str. 10)

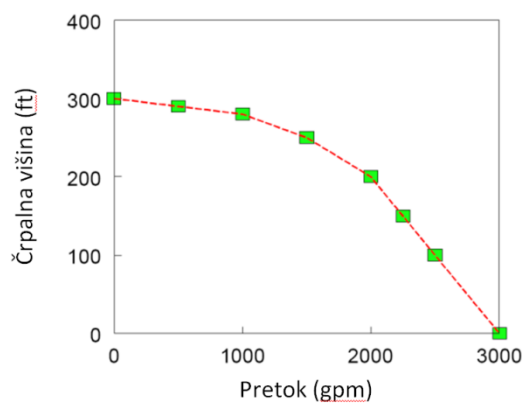
Priloga A 2: Krožni sistem vodovodnega omrežja
(Sketelj, 1957, str. 11)



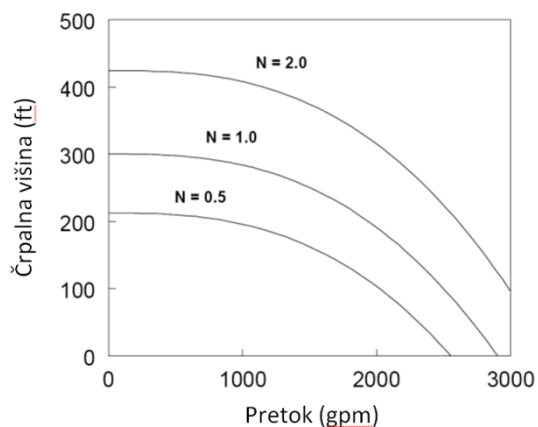
Priloga A 3: Moodyjev diagram
(Steinman, 2010, str. 48)



Priloga A 4: Tritočkovna črpalna krivulja
(Rossman, 2000, str. 35)



Priloga A 5: Večtočkovna črpalna krivulja
(Rossman, 2000, str. 35)



Priloga A 6: Črpalne krivulje črpalke s spremenljivo hitrostjo
(Rossman, 2000, str. 35)

Opomba: na prilogah od A 4 do A 6 so uporabljene naslednje enote:

- ft: čevelj ($1 \text{ ft} \cong 0,30480 \text{ m}$)
- gpm: galone na minuto ($1 \text{ gpm} \cong 0,06309 \text{ l/s}$)

B Priloge hipotetičnega primera

Converting SI to U.S. Customary Units

We use Canadian spelling here (metres for meters and litres for liters).

<i>To convert from (SI)</i>	<i>Conversion factor</i>	<i>To get U.S. Customary</i>
Length and velocity		
Metres (m)	Multiply by 3.28084	Feet (ft)
Metres	Multiply by 1.09361	Yards
Metres per second (m/s)	Multiply by 2.23694	Miles per hour (mph)
Centimeters (cm)	Multiply by 0.3937	Inches (in.)
Milimeters (mm)	Multiply by 0.03937	Inches
Kilometers (km)	Multiply by 0.621371	Miles (mi)
m ³ /(m ² -day) = m/day	Multiply by 24.5421	gpd/ft ²
Area		
cm ²	Multiply by 0.155	Square inch
m ²	Multiply by 10.76391	Square foot (ft ²)
Hectare (ha = 10 000 m ²)	Multiply by 2.471054	Acre
km ² (= 100 ha = 10 ⁶ m ²)	Multiply by 0.38610216	Square mile
Volume and Flow		
Litres (= 1 dm ³)	Divide by 28.31685	Cubic foot (ft ³)
cubic metre (m ³)	Multiply by 35.31467	ft ³
Litres (L)	Multiply by 0.264172	U.S. gal
Litres (L)	Multiply by 0.219969	Imp. gal
Litres/(s-ha)	Multiply by 0.014	Inches/hour
m ³	Divide by 3 785.412	Million U.S. gal (mg/MG)
m ³	Multiply by 8.521662	Barrel (US)
m ³	Divide by 1 233.481	Acre-ft
Liters per second (L/s)	Divide by 43.8126	Million U.S. gal/day (mgd/MGD)
(L/s)	Multiply by 15.8508	gal/min (gpm)
Liters/m ²	Divide by 40.7458	gal/ft ²
Mass		
Gram (g)	Divide by 453.5924	Pounds (lb)
Gram	Multiply by 15.432	Grain
Kilogram ³ (kg = 1 000 g)	Multiply by 2.204623	Pounds
Newton (= 0.1 kgb)	Multiply by 0.2247	Pounds
Tonne, Metric ton (= 1 000 kg)	Multiply by 1.10231	U.S. ton
Tonne (t)	Multiply by 0.984206	English ton
<i>To convert from (SI)</i>	<i>Conversion factor</i>	<i>To get U.S. Customary</i>
Concentration		
Milligram per liter	Multiply by 1.0	Parts per million (ppm)

SI-US Unit Conversion

(mg/liter = g/m ³)		
mg/liter	Divide by 2.28835	Grain/ft ³
Microgram per liter	Multiply by 1.0	Parts per billion (ppb)
(ug/liter = 10 ⁻³ g/m ³)		
Density		
kg/m ³	Multiply by 0.062428	lb/ft ³
g/m ³	Multiply by 6.2428 x 10 ⁻⁵	lb/ft ³
m ³ /kg	Multiply by 16.0185	ft ³ /lb
Pressure		
g/m ²	Divide by 4 882.43	lb/ft ²
Bar (= 10 ⁵ N/m ²)	Multiply by 14.5038	psi (= lb/in. ²)
kg/m ²	Divide by 4.88243	lb/ft ²
kg/cm ²	Multiply by 14.2233	psi
Energy etc.		
Watt (W = N x m/s)	Multiply by 3.41214	Btu/hr
Kilowatts (kW = 1 000 W)	Multiply by 1.34048	Horsepower (hp)
Kilowatt-hours (kW-hr)	Multiply by 3 414.4259	Btu
W/m ³	Multiply by 5	hp/mg
kW-hr/(m ² x°C)	Multiply by 176.228	Btu/ft ² /°F
kW-hr/(m ³ x°C)	Multiply by 53.714	Btu/ft ³ /°F
Calories (gram)	Divide by 251.9957	Btu
1 calorie = 1.16 x 10 ⁻⁶ kW-hr		
Degree celsius (°C)	Multiply °C by 1.8 and add 32	Degrees Fahrenheit (°F)

Some constants

1 m³ of water weighs 1 000 kg.
 1 ft³ of water weighs 62.4 lb.
 1 U.S. gal of water weighs 8.34 lb.
 1 Imp. (English) gal of water weighs 10 lb.
 1 day has 1 440 minutes and 86 400 seconds.

Some magnitude prefixes for SI units

G	giga	10 ⁹
M	mega	10 ⁶
k	kilo	10 ³
m	milli	10 ⁻³
μ	micro	10 ⁻⁶

Time abbreviations

Second	s
Minute	min
Hour	h
Day	d
Week	week
Month	month
Year	y

*Metric kilograms in this table are weight kilograms, which equal 9.81 (m/s²) x kg (mass) = 9.81 Newtons.

Priloga B 2: Tabela koeficientov pretvorbe med merskimi sistemi – nadaljevanje

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V											
1																																	
2	NODES																																
3	ANYTOWN example											ANYTOWN example											ANYTOWN example										
4	Network Table - Nodes at 0:00 Hrs											Network Table - Nodes at 1:00 Hrs											Network Table - Nodes at 2:00 Hrs										
5	Elevation Base Der Demand				Head	Pressure	Elevation Base Der Demand				Head	Pressure	Elevation Base Der Demand				Head	Pressure															
6	Node ID	ft	GPM	GPM	ft	psi	Node ID	ft	GPM	GPM	ft	psi	Node ID	ft	GPM	GPM	ft	psi															
7	Junc 1	20	0	0	478.44	198.64	Junc 1	20	0	0	503.67	209.57	Junc 1	20	0	0	502.1	208.89															
8	Junc 2	20	500	600	478.31	198.58	Junc 2	20	500	200	503.59	209.54	Junc 2	20	500	250	502.01	208.86															
9	Junc 3	50	200	240	286.6	102.52	Junc 3	50	200	80	387.54	146.25	Junc 3	50	200	100	381.35	143.57															
10	Junc 4	50	200	240	264.32	92.86	Junc 4	50	200	80	374.08	140.42	Junc 4	50	200	100	367.34	137.5															
11	Junc 5	50	200	240	254.04	88.41	Junc 5	50	200	80	364.11	136.1	Junc 5	50	200	100	357.7	133.33															
12	Junc 6	80	200	240	230.12	65.05	Junc 6	80	200	80	328.07	107.49	Junc 6	80	200	100	325.16	106.23															
13	Junc 7	120	200	240	219.44	43.09	Junc 7	120	200	80	286.28	72.05	Junc 7	120	200	100	289.83	73.59															
14	Junc 8	120	200	240	220.12	43.38	Junc 8	120	200	80	272.84	66.23	Junc 8	120	200	100	280.47	69.53															
15	Junc 9	120	200	240	222.13	44.25	Junc 9	120	200	80	274.61	66.99	Junc 9	120	200	100	282.25	70.3															
16	Junc 10	50	500	600	238.8	81.81	Junc 10	50	500	200	510.2	112.75	Junc 10	50	500	250	513.73	114.28															
17	Junc 11	50	500	600	286.57	102.5	Junc 11	50	500	200	387.14	146.08	Junc 11	50	500	250	381.05	143.45															
18	Junc 12	50	500	600	255.31	88.96	Junc 12	50	500	200	368.37	137.95	Junc 12	50	500	250	361.37	134.92															
19	Junc 13	50	1000	1200	232.24	78.96	Junc 13	50	1000	400	346.46	128.45	Junc 13	50	1000	500	339.92	125.62															
20	Junc 14	50	500	600	235.52	80.38	Junc 14	50	500	200	347.14	128.75	Junc 14	50	500	250	341.06	126.12															
21	Junc 15	120	200	240	230.44	47.85	Junc 15	120	200	80	331.07	91.46	Junc 15	120	200	100	327.65	89.98															
22	Junc 16	50	500	600	233.3	79.42	Junc 16	50	500	200	333.96	123.04	Junc 16	50	500	250	330.49	121.54															
23	Junc 17	120	800	960	222.15	44.26	Junc 17	120	800	320	267.75	64.02	Junc 17	120	800	400	277.32	68.17															
24	Junc 18	120	0	0	222.14	44.26	Junc 18	120	0	0	264.95	62.81	Junc 18	120	0	0	275.27	67.28															
25	Junc 19	120	0	0	222.13	44.25	Junc 19	120	0	0	262.16	61.6	Junc 19	120	0	0	273.23	66.39															
26	Resrv 20	10	#N/A	-7836.43	10	0	Resrv 20	10	#N/A	-5933.22	10	0	Resrv 20	10	#N/A	-6051.87	10	0															
27	Tank 21	215	#N/A	156.43	222	3.03	Tank 21	215	#N/A	3373.22	223	3.47	Tank 21	215	#N/A	2851.87	244.53	12.79															

Priloga B 3: Izpis podatkov iz EPANet 2.0 in prenos v Excel – pretvorba v SI merski sistem

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V											
7	ANYTOWN example											ANYTOWN example											ANYTOWN example										
8	Network Table - Nodes at 0:00 Hrs											Network Table - Nodes at 1:00 Hrs											Network Table - Nodes at 2:00 Hrs										
9	Elevation Base Der Demand				Head	Pressure	Elevation Base Der Demand				Head	Pressure	Elevation Base Der Demand				Head	Pressure															
10	Node ID	m	LPS	LPS	m	psi	Node ID	m	LPS	LPS	m	psi	Node ID	m	LPS	LPS	m	psi															
11	Junc 1	6.096	0	0	145.829	139.61	Junc 1	6.096	0	0	153.519	147.292	Junc 1	6.096	0	0	153.04	146.814															
12	Junc 2	6.096	31.5441	37.853	145.789	139.568	Junc 2	6.096	31.5441	12.6177	153.494	147.271	Junc 2	6.096	31.5441	15.7721	153.013	146.793															
13	Junc 3	15.24	12.6177	15.1412	87.3557	72.0539	Junc 3	15.24	12.6177	5.04706	118.122	102.789	Junc 3	15.24	12.6177	6.30883	116.235	100.905															
14	Junc 4	15.24	12.6177	15.1412	80.5647	65.2646	Junc 4	15.24	12.6177	5.04706	114.02	98.6911	Junc 4	15.24	12.6177	6.30883	111.965	96.6389															
15	Junc 5	15.24	12.6177	15.1412	77.4314	62.137	Junc 5	15.24	12.6177	5.04706	110.981	95.6549	Junc 5	15.24	12.6177	6.30883	109.027	93.7081															
16	Junc 6	24.384	12.6177	15.1412	70.1406	45.719	Junc 6	24.384	12.6177	5.04706	99.9957	75.547	Junc 6	24.384	12.6177	6.30883	99.1088	74.6614															
17	Junc 7	36.576	12.6177	15.1412	66.8853	30.2849	Junc 7	36.576	12.6177	5.04706	87.2581	50.6388	Junc 7	36.576	12.6177	6.30883	88.3402	51.7211															
18	Junc 8	36.576	12.6177	15.1412	67.0926	30.4887	Junc 8	36.576	12.6177	5.04706	83.1616	46.5483	Junc 8	36.576	12.6177	6.30883	85.4873	48.8676															
19	Junc 9	36.576	12.6177	15.1412	67.7052	31.1001	Junc 9	36.576	12.6177	5.04706	83.7011	47.0825	Junc 9	36.576	12.6177	6.30883	86.0298	49.4088															
20	Junc 10	15.24	31.5441	37.853	72.7862	57.4984	Junc 10	15.24	31.5441	12.6177	94.549	79.2439	Junc 10	15.24	31.5441	15.7721	95.6249	80.3192															
21	Junc 11	15.24	31.5441	37.853	87.3465	72.0399	Junc 11	15.24	31.5441	12.6177	118	102.669	Junc 11	15.24	31.5441	15.7721	116.144	100.821															
22	Junc 12	15.24	31.5441	37.853	77.8185	62.5236	Junc 12	15.24	31.5441	12.6177	112.279	96.9552	Junc 12	15.24	31.5441	15.7721	110.146	94.8256															
23	Junc 13	15.24	63.0883	75.706	70.7867	55.4953	Junc 13	15.24	63.0883	25.2353	105.601	90.2783	Junc 13	15.24	63.0883	31.5441	103.608	88.2893															
24	Junc 14	15.24	31.5441	37.853	71.7865	56.4933	Junc 14	15.24	31.5441	12.6177	105.808	90.4891	Junc 14	15.24	31.5441	15.7721	103.955	88.6407															
25	Junc 15	36.576	12.6177	15.1412	70.2381	33.6303	Junc 15	36.576	12.6177	5.04706	100.91	64.2807	Junc 15	36.576	12.6177	6.30883	99.8677	63.2405															
26	Junc 16	15.24	31.5441	37.853	71.1098	55.8186	Junc 16	15.24	31.5441	12.6177	101.791	86.476	Junc 16	15.24	31.5441	15.7721	100.733	85.4217															
27	Junc 17	36.576	50.4706	60.5648	67.7113	31.1072	Junc 17	36.576	50.4706	20.1883	81.6102	44.9951	Junc 17	36.576	50.4706	25.2353	84.5271	47.9118															
28	Junc 18	36.576	0	0	67.7083	31.1072	Junc 18	36.576	0	0	80.7568	44.1446	Junc 18	36.576	0	0	83.9023	47.2863															
29	Junc 19	36.576	0	0	67.7052	31.1001	Junc 19	36.576	0	0	79.9064	43.2942	Junc 19	36.576	0	0	83.2805	46.6608															
30	Resrv 20	3.048	#N/A	-494.387	3.048	0	Resrv 20	3.048	#N/A	-374.317	3.048	0	Resrv 20	3.048	#N/A	-381.802	3.048	0															
31	Tank 21	65.532	#N/A	9.8689	67.6656	2.12957	Tank 21	65.532	#N/A	212.811	67.9704	2.43881	Tank 21	65.532	#N/A	179.92	74.5327	8.98917															

Priloga B 4: Izpis podatkov iz EPANet 2.0 in prenos v Excel – pretvorba enot

Opomba: razlaga angleških pojmov, ki so uporabljeni za prikaz podatkov na prilogah B 3 in B 4:

- Junc *i*: vozlišče *i* v sistemu,
- X:XX Hrs: izpis podatkov v času X:XX,
- Elevation (ft): nadmorska višina, merjena v čevljih,
- Demand (GPM): poraba, merjena v galonah na minuto,
- Head (ft): energijska črta, merjena v čevljih,
- Pressure (psi): tlak, merjen v funtih na kvadratni palec.

C-factors for various pipe materials

Type of Pipe	C-factor Values for Discrete Pipe Diameters					
	1.0 in. (2.5 cm)	3.0 in. (7.6 cm)	6.0 in. (15.2 cm)	12 in. (30 cm)	24 in. (61 cm)	48 in. (122 cm)
Uncoated cast iron - smooth and new		121	125	130	132	134
Coated cast iron - smooth and new		129	133	138	140	141
30 years old						
Trend 1 - slight attack		100	106	112	117	120
Trend 2 - moderate attack		83	90	97	102	107
Trend 3 - appreciable attack		59	70	78	83	89
Trend 4 - severe attack		41	50	58	66	73
60 years old						
Trend 1 - slight attack		90	97	102	107	112
Trend 2 - moderate attack		69	79	85	92	96
Trend 3 - appreciable attack		49	58	66	72	78
Trend 4 - severe attack		30	39	48	56	62
100 years old						
Trend 1 - slight attack		81	89	95	100	104
Trend 2 - moderate attack		61	70	78	83	89
Trend 3 - appreciable attack		40	49	57	64	71
Trend 4 - severe attack		21	30	39	46	54
Miscellaneous						
Newly scraped mains		109	116	121	125	127
Newly brushed mains		97	104	108	112	115
Coated spun iron - smooth and new		137	142	145	148	148
Old - take as coated cast iron of same age						
Galvanized iron - smooth and new	120	129	133			
Wrought iron - smooth and new	129	137	142			
Coated steel - smooth and new	129	137	142	145	148	148
Uncoated Steel - smooth and new	134	142	145	147	150	150
Coated asbestos cement - clean		147	149	150	152	
Uncoated asbestos cement - clean		142	145	147	150	
Spun cement-lined and spun bitumen-lined - clean		147	149	150	152	153
Smooth pipe (including lead, brass, copper, polyethylene, and PVC) - clean	140	147	149	150	152	153
PVC wavy - clean	134	142	145	147	150	150
Concrete - Scobey						
Class 1 - $C_s = 0.27$; clean		69	79	84	90	95
Class 2 - $C_s = 0.31$; clean		95	102	106	110	113
Class 3 - $C_s = 0.345$; clean		109	116	121	125	127
Class 4 - $C_s = 0.37$; clean		121	125	130	132	134
Best - $C_s = 0.40$; clean		129	133	138	140	141
Tate relined pipes - clean		109	116	121	125	127
Prestressed concrete pipes - clean				147	150	150

Lamont (1981)

Priloga B 5: Tabela koeficientov hrapavosti C po Hazen-Williamsu (Walski et al., 2003, str. 640)

Equivalent sand grain roughness for various pipe materials

Material	Equivalent Sand Roughness, ϵ	
	(ft)	(mm)
Copper, brass	$1 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-3}$	$3.05 \times 10^{-2} - 0.9$
Wrought iron, steel	$1.5 \times 10^{-4} - 8 \times 10^{-3}$	$4.6 \times 10^{-2} - 2.4$
Asphalt-lined cast iron	$4 \times 10^{-4} - 7 \times 10^{-3}$	0.1 – 2.1
Galvanized iron	$3.3 \times 10^{-4} - 1.5 \times 10^{-2}$	0.102 – 4.6
Cast iron	$8 \times 10^{-4} - 1.8 \times 10^{-2}$	0.2 – 5.5
Concrete	$10^{-3} - 10^{-2}$	0.3 – 3.0
Uncoated Cast Iron	7.4×10^{-4}	0.226
Coated Cast Iron	3.3×10^{-4}	0.102
Coated Spun Iron	1.8×10^{-4}	5.6×10^{-2}
Cement	$1.3 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-3}$	0.4 – 1.2s
Wrought Iron	1.7×10^{-4}	5×10^{-2}
Uncoated Steel	9.2×10^{-5}	2.8×10^{-2}
Coated Steel	1.8×10^{-4}	5.8×10^{-2}
Wood Stave	$6 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-3}$	0.2 – 0.9
PVC	5×10^{-6}	1.5×10^{-3}

Compiled from Lamont (1981), Moody (1944), and Mays (1999)

Priloga B 6: Tabela nadomestne velikosti peščenih zrn za opis tehnične hrapavosti
(Walski et al., 2003, str. 639)

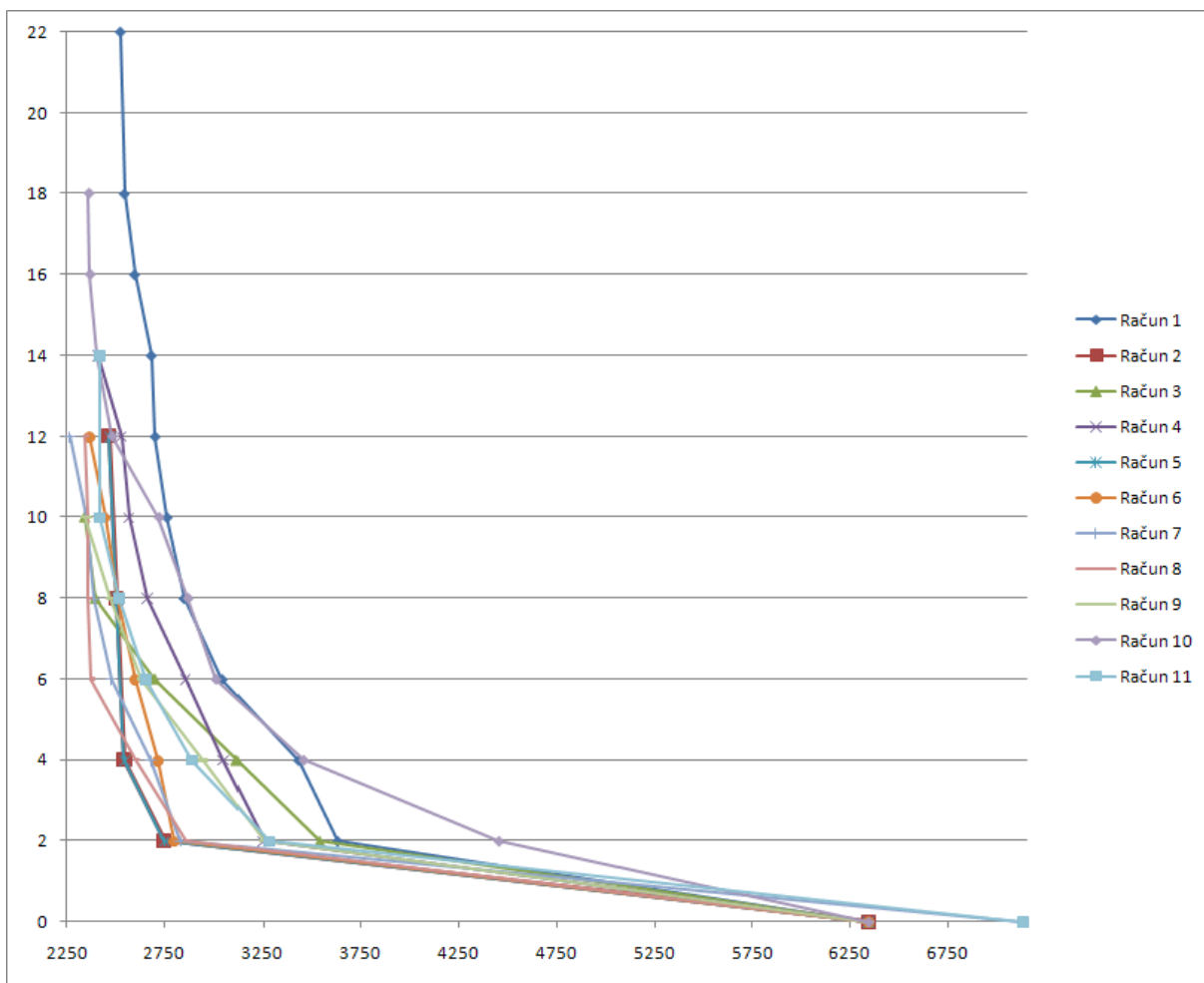
The image shows five Notepad windows displaying simulation data for three nodes (1, 2, and 3) over a 24-hour period. The data is organized into columns for Demand (LPS), Head (m), Pressure (m), Flow (LPS), and Velocity (mps). Node 1 shows a constant demand of 0.000 LPS, while nodes 2 and 3 show varying demand patterns. Head and pressure values decrease as time progresses, and flow and velocity values fluctuate significantly.

Node	Time	Demand (LPS)	Head (m)	Pressure (m)	Flow (LPS)	Velocity (mps)
1	0:00	0.000	145.829	139.610	494.387	1.085
	1:00	0.000	153.519	147.292	374.317	0.820
	2:00	0.000	153.040	146.814	381.802	0.838
	3:00	0.000	152.552	146.329	389.401	0.853
	4:00	0.000	159.389	153.160	282.636	0.619
	5:00	0.000	156.804	150.581	323.012	0.707
	6:00	0.000	154.220	147.995	363.389	0.796
	7:00	0.000	151.632	145.408	403.765	0.884
	8:00	0.000	149.047	142.829	444.142	0.975
	9:00	0.000	148.175	141.957	457.735	1.003
	10:00	0.000	148.050	141.831	459.676	1.009
	11:00	0.000	155.064	148.838	350.182	0.768
	12:00	0.000	164.562	158.326	201.883	0.442
	13:00	0.000	161.977	155.747	242.259	0.530
	14:00	0.000	159.389	153.160	282.636	0.619
	15:00	0.000	156.804	150.581	323.012	0.707
	16:00	0.000	154.220	147.995	363.389	0.796
	17:00	0.000	151.632	145.408	403.765	0.884
	18:00	0.000	149.047	142.829	444.142	0.975
	19:00	0.000	148.175	141.957	457.735	1.003
	20:00	0.000	148.050	141.831	459.676	1.009
	21:00	0.000	155.064	148.838	350.182	0.768
	22:00	0.000	164.562	158.326	201.883	0.442
	23:00	0.000	161.977	155.747	242.259	0.530
24:00	0.000	159.389	153.160	282.636	0.619	
2	0:00	37.853	145.789	139.568	157.366	2.158
	1:00	12.618	153.494	147.271	120.008	1.646
	2:00	15.772	153.013	146.793	122.562	1.679
	3:00	18.926	152.525	146.301	125.050	1.713
	4:00	22.081	159.377	153.146	89.900	1.231
	5:00	25.235	156.786	150.560	102.743	1.408
	6:00	28.390	154.195	147.973	115.586	1.585
	7:00	31.544	151.604	145.380	128.429	1.759
	8:00	34.699	149.014	142.794	141.272	1.935
	9:00	37.853	148.142	141.922	145.243	1.990
	10:00	37.853	148.017	141.796	145.889	1.999
	11:00	12.618	155.043	148.817	112.323	1.539
	12:00	15.772	164.555	158.319	64.214	0.881
	13:00	18.926	161.965	155.733	77.057	1.055
	14:00	22.081	159.377	153.146	89.900	1.231
	15:00	25.235	156.786	150.560	102.743	1.408
	16:00	28.390	154.195	147.973	115.586	1.585
	17:00	31.544	151.604	145.380	128.429	1.759
	18:00	34.699	149.014	142.794	141.272	1.935
	19:00	37.853	148.142	141.922	145.243	1.990
	20:00	37.853	148.017	141.796	145.889	1.999
	21:00	12.618	155.043	148.817	112.323	1.539
	22:00	15.772	164.555	158.319	64.214	0.881
	23:00	18.926	161.965	155.733	77.057	1.055
24:00	22.081	159.377	153.146	89.900	1.231	
3	0:00	15.141	87.356	72.054	44.312	0.875
	1:00	5.047	118.122	102.789	33.748	0.668
	2:00	6.309	116.235	100.905	34.490	0.680
	3:00	7.571	114.352	99.028	35.203	0.695
	4:00	8.832	138.660	123.311	25.312	0.500
	5:00	10.094	130.256	114.912	28.927	0.570

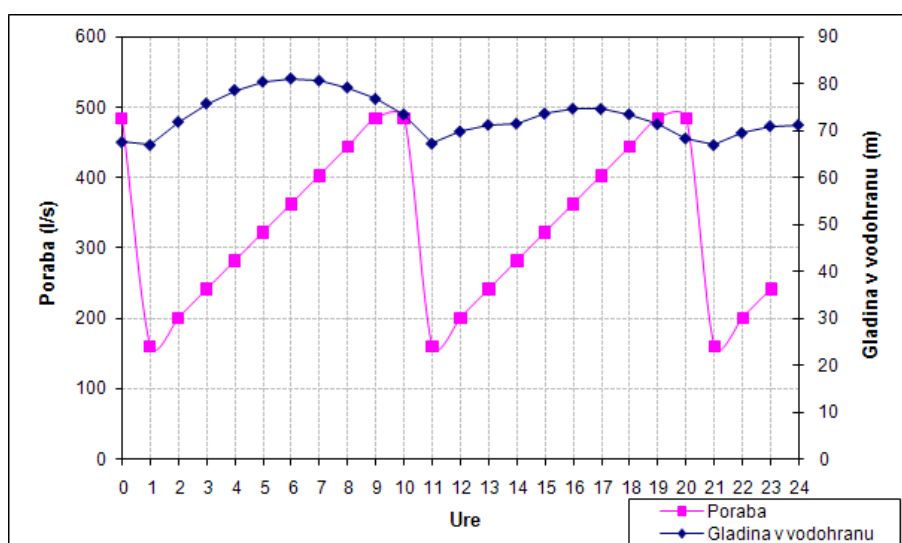
Priloga B 7: Datoteke s podatki za umerjanje

Opomba: uporabljene merske enote in angleški pojmi:

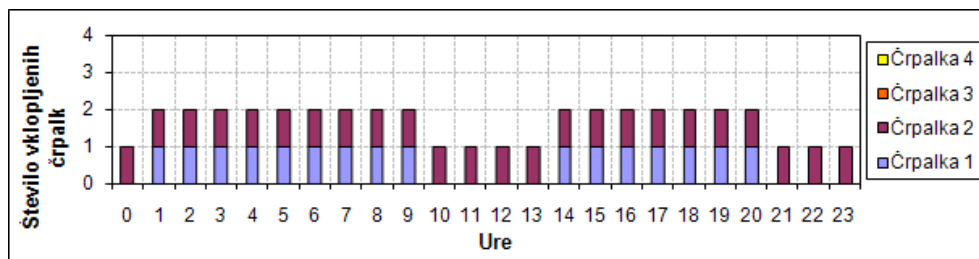
- Demand: poraba (LPS – l/s)
- Head: energija (m VS)
- Pressure: tlak (m VS)
- Flow: pretok (LPS – l/s)
- Velocity: hitrost (mps – m/s)



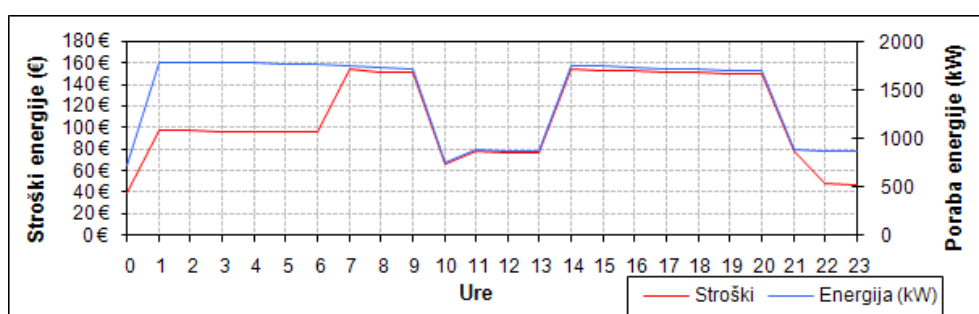
Priloga B 8: Pareto fronte vseh optimizacijskih računov



Priloga B 9: Graf porabe in gladine v vodohranu (4 preklopi črpalk)



Priloga B 10: Prikaz vklopljenih črpalk (4 preklopi črpalk)



Priloga B 11: Urni stroški in poraba energije (4 preklopi črpalk)

Čas dneva (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Strošek električne energije (€/kWh)	0.0541	0.0541	0.0541	0.0541	0.0541	0.0541	0.0541	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876

Odločitvene spremenljivke

Črpalka 1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Črpalka 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Črpalka 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Črpalka 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Izhodni podatki

Tank level	67.67	67.06	72.01	75.92	78.77	80.55	81.23	80.81	79.33	76.89	73.59
Reservoir outflow	-289.13	-322.02	-328.66	-334.83	-340.50	-345.08	-349.59	-355.78	-365.08	-377.61	-282.78
Demands	484.52	161.51	201.88	242.26	282.64	323.01	363.39	403.77	444.14	484.52	484.52

Energy Consumption Pump1 (kW)	0.0	754.7	762.2	769.2	775.2	776.2	776.3	776.0	775.1	772.6	0.0
Energy Consumption Pump2 (kW)	721.1	1032.9	1023.6	1014.4	1006.0	997.1	987.9	975.4	956.4	944.7	749.1
Energy Consumption Pump3 (kW)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Energy Consumption Pump4 (kW)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Energy Cost Pump 1 (€/hour)	0.00 €	40.83 €	41.24 €	41.61 €	41.94 €	41.99 €	42.00 €	67.98 €	67.90 €	67.68 €	0.00 €
Energy Cost Pump 2 (€/hour)	39.01 €	55.88 €	55.37 €	54.88 €	54.43 €	53.94 €	53.45 €	85.44 €	83.78 €	82.76 €	65.62 €
Energy Cost Pump 3 (€/hour)	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €
Energy Cost Pump 4 (€/hour)	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €

Priloga B 12: Tabela odločitvenih spremenljivk in izhodnih podatkov – izpis v programu GANetXL (4 preklopi črpalk)

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0541	0.0541	0

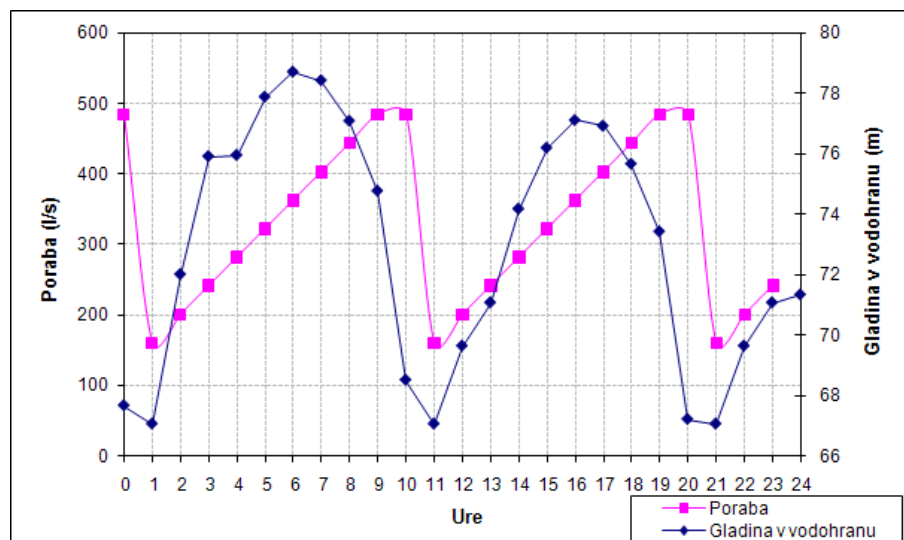
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

67.37	69.94	71.36	71.61	73.76	74.81	74.75	73.62	71.49	68.47	67.06	69.64	71.07	71.33
-244.77	-247.91	-250.44	-352.27	-357.00	-361.48	-367.05	-375.11	-386.51	-391.50	-245.19	-248.34	-250.88	-253.51
161.51	201.88	242.26	282.64	323.01	363.39	403.77	444.14	484.52	484.52	161.51	201.88	242.26	282.64

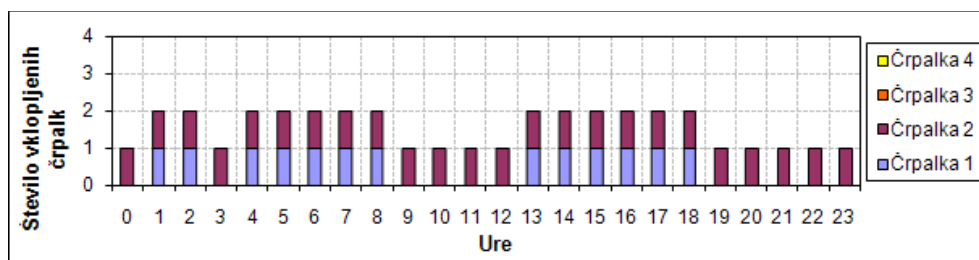
0.0	0.0	0.0	776.2	775.9	775.5	774.8	773.2	770.0	768.3	0.0	0.0	0.0	0.0
883.7	877.0	871.4	982.5	972.9	963.8	952.4	945.8	940.4	937.7	882.8	876.0	870.4	863.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

0.00 €	0.00 €	0.00 €	68.00 €	67.97 €	67.94 €	67.87 €	67.73 €	67.45 €	67.30 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €
77.41 €	76.82 €	76.33 €	86.07 €	85.22 €	84.43 €	83.43 €	82.85 €	82.38 €	82.14 €	77.33 €	47.39 €	47.09 €	0.00 €
0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €
0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €

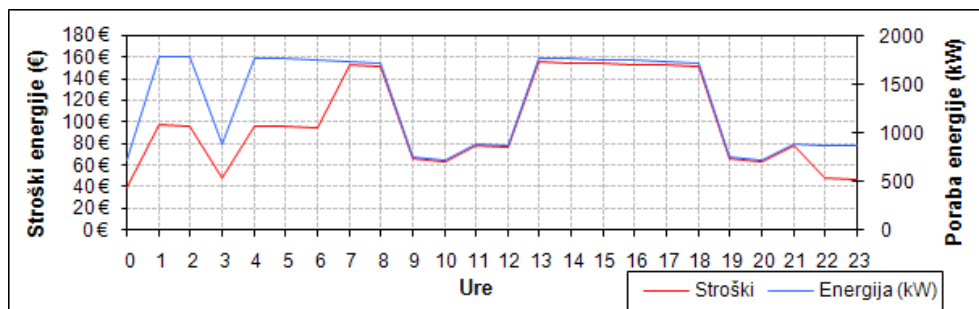
Priloga B 13: Tabela odločitvenih spremenljivk iz izhodnih podatkov – izpis v programu GANetXL (4 preklopi črpalk) (nadaljevanje)



Priloga B 14: Graf porabe in gladine v vodohranu (6 preklopov črpalk)



Priloga B 15: Prikaz vklopljenih črpalk (6 preklopov črpalk)



Priloga B 16: Urni stroški in poraba energije (6 preklpov črpalk)

Čas dneva (h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Strošek električne energije (€/kWh)	0.0541	0.0541	0.0541	0.0541	0.0541	0.0541	0.0541	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876

Odločitvene spremenljivke

Črpalka 1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0
Črpalka 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Črpalka 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Črpalka 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Izhodni podatki

Tank level	67.67	67.06	72.01	75.92	75.95	77.88	78.71	78.43	77.09	74.77	68.51
Reservoir outflow	-289.13	-322.02	-328.66	-243.53	-345.23	-349.82	-354.29	-360.21	-369.00	-281.52	-288.22
Demands	484.52	161.51	201.88	242.26	282.64	323.01	363.39	403.77	444.14	484.52	484.52
Energy Consumption Pump1 (kW)	0.0	754.7	762.2	0.0	776.2	776.3	776.1	775.7	774.4	0.0	0.0
Energy Consumption Pump2 (kW)	721.1	1032.9	1023.6	886.3	996.8	987.5	978.4	966.3	948.5	754.5	725.1
Energy Consumption Pump3 (kW)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Energy Consumption Pump4 (kW)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Energy Cost Pump 1 (€/hour)	0.00 €	40.83 €	41.24 €	0.00 €	41.99 €	42.00 €	41.99 €	67.95 €	67.84 €	0.00 €	0.00 €
Energy Cost Pump 2 (€/hour)	39.01 €	55.88 €	55.37 €	47.95 €	53.93 €	53.42 €	52.93 €	84.65 €	83.09 €	66.09 €	63.52 €
Energy Cost Pump 3 (€/hour)	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €
Energy Cost Pump 4 (€/hour)	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €

Priloga B 17: Tabela odločitvenih spremenljivk in izhodnih podatkov – izpis v programu GANetXL (6 preklpov črpalk)

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0876	0.0541	0.0541

0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

67.06	69.64	71.07	74.17	76.19	77.11	76.92	75.67	73.43	67.21	67.06	69.64	71.07	71.33
-245.19	-248.34	-342.92	-348.14	-352.79	-357.24	-363.03	-371.49	-282.96	-289.61	-245.19	-248.34	-250.88	-253.51
161.51	201.88	242.26	282.64	323.01	363.39	403.77	444.14	484.52	484.52	161.51	201.88	242.26	282.64

0.0	0.0	776.1	776.3	776.2	775.9	775.3	774.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
882.8	876.0	1001.5	990.9	981.4	972.4	960.6	947.2	748.3	718.9	882.8	876.0	870.4
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

0.00 €	0.00 €	67.99 €	68.00 €	67.99 €	67.97 €	67.92 €	67.80 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €
77.33 €	76.74 €	87.73 €	86.80 €	85.97 €	85.18 €	84.15 €	82.97 €	65.55 €	62.97 €	77.33 €	47.39 €	47.09 €	0.00 €
0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €
0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €

Priloga B 18: Tabela odločitvenih spremenljivk in izhodnih podatkov – izpis v programu GANetXL (6 preklpov črpalk) (nadaljevanje)