



MERITVE PRI UČINKOVITEM UPRAVLJANJU SISTEMOV OSKRBE S PITNO VODO

dr. DANIEL KOZELJ¹

Povzetek

Upravljanje vodovodnih sistemov je zahtevna naloga, ki od upravljavca zahteva nadzor nad vsemi procesi oskrbe s pitno vodo. Nadzor nad temi procesi je omogočen z meritvami, ki jih upravljavci skoraj v realnem času spremljajo na ključnih objektih. Kljub velikemu številu meritev so procesi v distribucijskem omrežju velika neznanka. Za spremljanje teh procesov se zato uporabljajo hidravlični modeli, ki upravljavcu omogočajo učinkovit in smotrni nadzor nad hidravličnim delovanjem vodovodnega sistema. Uporaba hidravličnih modelov pri upravljanju pa je vedno podvržena določeni negotovosti. Negotovost se lahko zmanjša le, če je izvedeno kakovostno umerjanje modela in ocenjena stopnja zaupanja v modelne napovedi. Prispevek bo podrobneje orisal navedeni proces vključevanja hidravličnih modelov v postopke upravljanja vodovodnih sistemov, pri čemer bo poseben poudarek na zajemu meritev, ki naj bi dajale najvišjo raven informacij o procesih, ki se odvijajo v distribucijskem omrežju. Pri tem bodo predstavljeni tuji standardi in izkušnje avtorjev, in sicer v obliki smernic.

Ključne besede: distribucijsko omrežje, meritve, smernice, umerjanje, upravljanje vodovodnih sistemov

Abstract

Management of water systems is a challenging task, which requires the operational control of all processes of drinking water supply. Control of these processes is given through measurement in near real-time monitoring at key facilities. Despite the large number of measurements, processes in the distribution network is a big unknown. To monitor these processes the use of hydraulic models is emphasised, which allow the operator an efficient and effective control of the hydraulic operation of the water supply system. The use of hydraulic models in management is always subject to certain uncertainties. Uncertainty can be reduced only if the model is sufficiently calibrated and provides an assessment of the level of confidence in the model predictions. This paper will outline in greater detail the integration process of hydraulic models in operational management of water supply systems, with a special emphasis on measurement collection, to provide the highest level of information on the processes taking place in the distribution network. Presented will be foreign standards and experience of the authors in the form of guidelines.

¹ Asist. dr. Daniel Kozelj, univ. dipl. vod. in kom. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo



1. UVOD

Izboljšanje upravljanja vodovodnih sistemov je mogoče doseči, če se v proces nadzora vključijo podatki o njihovem delovanju v realnem času. Nadgradnjo take oblike nadzora in upravljanja pa je mogoče doseči z vključitvijo hidravličnih modelov, ki so neposredno povezani s podatki meritev, ki se spremljajo v nadzornem centru (angl. Supervisory Control and Data Acquisition; v nadaljevanju SCADA). Zbiranje meritev o delovanju vodovodnega sistema in njegovo modeliranje v realnem času pa pogosto spremljajo tudi različni viri negotovosti, ki pomembno vplivajo na sprejemanje operativnih odločitev. Prispevek obravnava ključne elemente, ki so potrebni za vzpostavitev informacijskega sistema modeliranja v realnem času, in oceno negotovosti v napovedi hidravličnih modelov.

Izboljšano upravljanje vodovodnih sistemov je ključno za preprečitev nastanka potencialno nasprotujočih ciljev, ki jih imajo do oskrbe s pitno vodo uporabniki, zahteve predpisov in lastniki upravljalca vodovodnega sistema. Visoke vodne izgube in stroški električne energije se pojavljajo v mnogih vodovodnih sistemih prav zaradi omejenega nadzora nad delovanjem vodovodnega sistema, kar bi ob njegovemu izboljšanju vodilo k boljši operativni zmogljivosti in končno k zmanjšanju potreb po dragih infrastrukturnih investicijah, ki jih končno občutijo predvsem potrošniki.

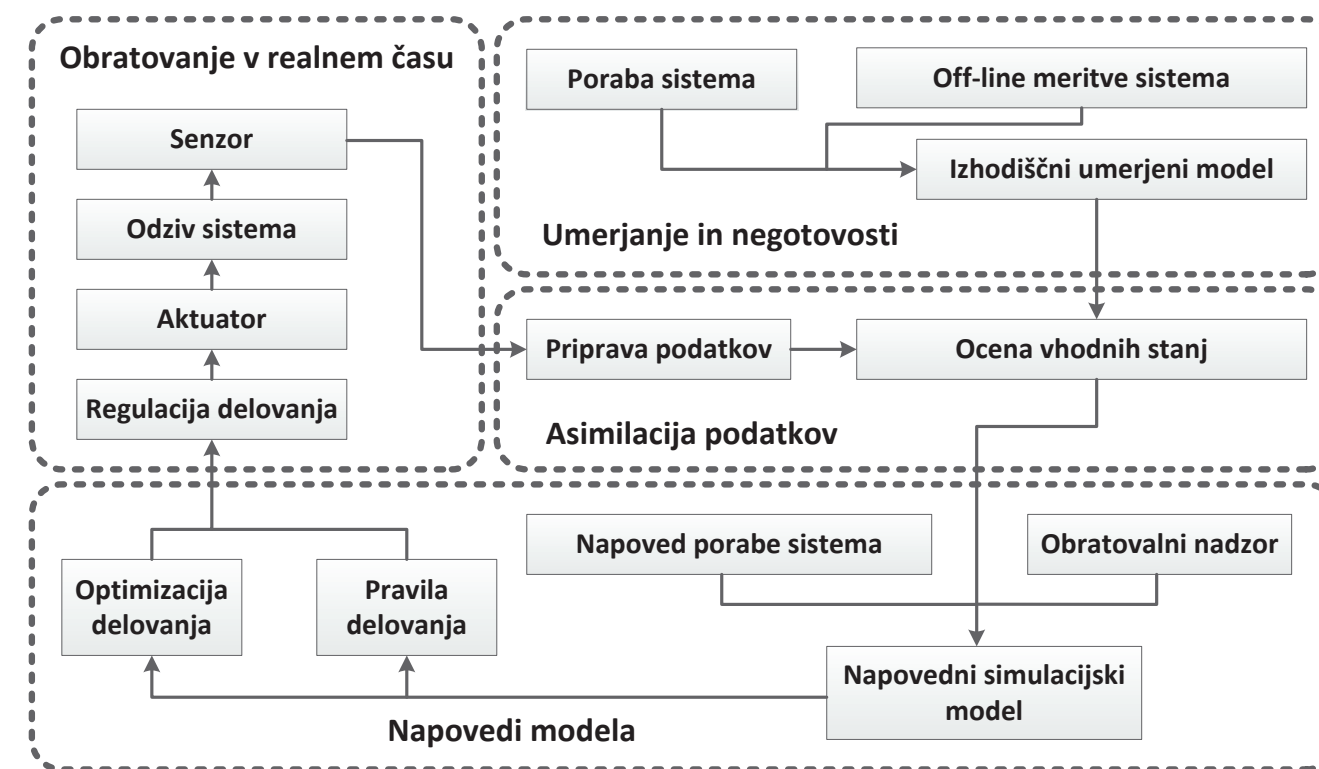
Razvoj merilne tehnike je povečal možnost spremljanja on-line podatkov o stanju delovanja vodovodnega sistema. Povezava sistema SCADA z daljinsko vodenimi krmilnimi napravami daje dodatno razsežnost upravljanju vodovodnih sistemov v realnem času. Izboljšanje operativne zmogljivosti in kompenziranje sistemskih nepravilnosti je sicer precej odvisno od sposobnosti in izkušenj sistemkega operaterja vodovodnega sistema, vendar so njegove odločitve lahko podprte z informacijami hidravličnega modela, ki simulira hidravlična stanja vodovodnega sistema v realnem času. Številne študije iz tujine so pokazale, da obstaja velik potencial izboljšanja upravljanja, če se on-line meritve sistema SCADA povežejo s hidravličnimi modeli (Machell in sod., 2010; Preis in sod., 2009; Rao in Salomons, 2007). Spajanje teh dveh informacijskih sistemov nam daje učinkovito orodje za podporo odločanju, s katerim lahko ekstrapoliramo hidravlična stanja v prostoru, tj. na lokacijah, ki niso podprte z meritvami, in v času, tj. s simulacijo hidravličnih stanj vodovodnega sistema v prihodnosti. Z razvojem računskih zmogljivosti računalnikov, programskimi orodji za simuliranje hidravličnih stanj, naprednimi orodji za umerjanje hidravličnih modelov in razvojem senzorjev je omogočena uporaba teh orodij za podporo odločanju v realnem času predvsem na dveh pomembnih področjih:

- zagotoviti opozorila o prihodnjih stanjih delovanja vodovodnega sistema, npr. ob lomih cevi (Bičik in sod., 2011),
- povečati razumevanje o obratovalnih stanjih vodovodnega sistema in prepoznavati različne upravljalne strategije za njihovo optimalno delovanje (Martinez in sod., 2007).

Orodja za podporo odločanju so vedno podvržena določeni stopnji negotovosti, ki jih v splošnem lahko razdelimo v dve skupini (Hall, 2003): (1) naključna negotovost, kot npr. prostorska in časovna variabilnost porabe vode, in (2) izkustvena negotovost, kot rezultat nepopolnega poznavanja sistema. Specifično lahko pri hidravlično podprtem odločanju izpostavimo tri krov-

ne vire negotovosti (Hutton in sod., 2011): (1) negotovost zaradi modelne strukture, ki izhaja iz skeletizacije hidravličnega modela, količine in alokacije porabe vode in numeričnega izračuna na podlagi kriterija zagotavljanja porabe (angl. demand-driven model); (2) negotovost modelnih parametrov, ki najpogosteje vključuje negotovosti glede hrapavosti cevovodov, podatkov o črpalnih krivuljah obrabljenih črpalk ipd.; (3) merilna negotovost, ki izvira iz merilnih napak samih instrumentov, naključne negotovosti pri beleženju porabe vode (tj. časovna in prostorska določljivost), izkustvene negotovosti zaradi merjenja porabe, ki ni v realnem času.

Procesni okvir, ki zelo nazorno opiše hidravlično modeliranje in upravljanje v realnem času, je na sliki 1. Prvi korak v tem procesu je umerjanje hidravličnih parametrov, kjer se s pomočjo off-line meritev vodovodnega sistema hidravlični model umeri, da kar najbolj izkazuje realno stanje. Sledi ocena vhodnih spremenljivk (npr. poraba vode in robni pogoji na objektih), ki so ocenjene na podlagi meritev v realnem času iz sistema SCADA. Z vključevanjem napovednega modela bodoče (kratkoročne) porabe je takemu orodju za podporo odločanju omogočeno, da simulira bodoča hidravlična stanja vodovodnega sistema in s tem možnost njegovega aktivnega upravljanja ter obratovanja vodovodnega sistema v realnem času.



Slika 1: Procesni okvir hidravličnega modeliranja in upravljanja v realnem času

Odločitve, ki se sprejemajo na podlagi takega orodja, morajo biti ovrednotene s strani negotovosti modelnih napovedi in posledičnih ukrepov upravljanja. Zmanjševanje negotovosti v modelnih napovedih in odločitvah je možno v prvi fazi s skrbnim umerjanjem hidravličnega modela, ki je podlaga za predstavljeno orodje podpore pri odločanju in oceno negotovosti za jetih meritev v sistemu SCADA.



2. ZAJEM MERITEV NA VODOVODNEM SISTEMU

Zbiranje podatkov izvedenih meritev na vodovodnem sistemu je sestavni del procesa nadzora in spremljanja stanja vodovodnega sistema, hkrati pa služi za umerjanje in oceno parametrov hidravličnega modela. S temi meritvami je mogoče preveriti istovetnost in zanesljivost napovedi hidravličnega modela. V splošnem lahko namene izvajanja meritev na vodovodnem sistemu delimo v naslednje skupine (Loaiciga in sod., 1992):

- meritve, ki dajejo informacije o karakteristikah vodovodnega sistema,
- meritve za odkrivanje virov problemov na vodovodnih sistemih,
- meritve za nadzor in ohranjanje ustreznega delovanja vodovodnega sistema in
- meritve za ciljno raziskovanje.

2.1. Off-line meritve

Opravljanje meritev in izbira merilnih mest sta pomembni nalogi in zahtevata kakovost pridobljenih informacij o delovanju vodovodnega sistema. V praksi se za potrebe umerjanja hidravličnega modela običajno uporabljata dva pristopa pridobivanja meritev. Prvi obsega zajem meritev v običajnih obratovalnih razmerah oziroma obtežbenih primerih, ki so namenjene daljšemu kontinuiranemu spremljanju in zajemu dinamičnega delovanja vodovodnega sistema. Z meritvami zbiramo podatke o tlakih, pretokih in gladinah v vodohranih, njihov zajem pa se opravi na določenih strateških (kritičnih) mestih v omrežju kakor tudi neposredno na objektih vodovodnega sistema. Poleg naštetih hidravličnih veličin je nujno tudi pridobivanje podatkov oziroma meritev o količini in dinamiki porabe velikih odjemalcev, stanju delovanja in krmiljenja črpalk kakor tudi drugih regulacijskih armatur.

Drugi pristop pa temelji na zbiranju meritev v izrednih obratovalnih primerih, kot npr. ob požarnih testih, kjer se nadzorovano odvzemajo večje količine vode iz hidrantov ob hkratnem spremljanju vseh hidravličnih veličin. Ti obtežbeni primeri so uporabni za ugotavljanje in kasnejše umerjanje fizičnih karakteristik hidravličnega modela in so glede na časovni kriterij statičnega tipa. Požarni testi so lahko stroškovno zahtevnejši od zbiranja meritev v običajnih razmerah, saj se odvzemajo velike količine vode, ki lahko vodijo do poslabšanja kakovosti vode (npr. zaradi luščenja oblog in reaktivacije usedlih koloidnih delcev) ter tudi do izpada določenega dela vodovodnega sistema, če pride do motenj pri delovanju regulacijskih armatur.

Kakovost meritev je odvisna od uporabljene merilne opreme, ki mora biti ustrezno izbrana glede na namen merjenja in tudi predhodno umerjena, da se zagotovita pravilno delovanje in ustrezna natančnost rezultatov. Water Research Centre (1989) je za uporabo merilne opreme, ki se nanaša posebej na vodovodne sisteme, izdal smernico glede mejnih merilnih negotovosti:

- meritve pretokov v ceveh: $\pm 5\%$,
- meritve tlakov v vozliščih: ± 250 mm vodnega stolpca (VS),
- meritve nivoja gladin vodohranov, rezervoarjev: ± 100 mm VS,
- meritve pretokov vodohranov, rezervoarjev: $\pm 5\%$.

Z ustrezno umerjeno merilno opremo in meritvami, ki so znotraj tolerančnih meja, se poveča tudi zanesljivost umerjanja hidravličnega modela vodovodnega sistema (slika 1).

2.2. On-line meritve

Upravljapec vodovodnega sistema lahko na enostaven način vodi in dostopa do on-line meritev preko sistema SCADA. SCADA shranjuje podatke o meritvah hidravličnih veličin, kot so tlak, pretok, nivoji gladin v vodohranih in črpališčih, število vrtljajev črpalk ipd. Poleg hidravličnih veličin se spremljajo tudi drugi parametri, npr. motnost vode, doziranje klorinativ, električna prevodnost vode, temperatura vode, električna napetost naprav, status oziroma odstotek odprtosti ventilov itd. Te meritve se običajno izvajajo na ključnih objektih vodovodnega sistema, ki so hkrati tudi robni pogoji za izvedbo hidravličnega preračuna. Najpogosteje se ti pridobljeni podatki uporabijo le za analizo odkrivanja okvar ali izboljševanje obratovanja vodovodnega sistema. Zbrani podatki pa se lahko uporabijo tudi v kombinaciji s hidravličnimi modeli vodovodnega sistema. V tem primeru se mora izdelovalec oziroma skrbnik hidravličnega modela odločiti, katere podatke sistema SCADA bo uporabil kot robne pogoje modela in katere bo uporabil za preverjanje istovetnosti modela z realnim vodovodnim sistemom.

Poznamo več možnih tipov izhodnih podatkov sistema SCADA: (1) analogni podatki, kamor spadajo realna števila, ki so nosilci informacije o izmerjeni vrednosti; (2) digitalni podatki, kamor spada binarni zapis, ki opredeljuje stanje nekega elementa; (3) impulzni podatki so npr. podatki, pridobljeni z vodomerni; (4) statusi, kjer gre za sposobnost identifikacije neveljavnih analognih podatkov. Ti podatki se zbirajo v nadzornem centru na računalniških strežnikih in s tem predstavljajo tako delovanje vodovodnega sistema v preteklost kot tudi v realnem času.

Kljub razširjenosti meritev sistemov SCADA je treba pri njihovi uporabi paziti na morebitne napake. Vzroki napak lahko zajemajo tako napake pri zgoščevanju podatkov (angl. compression), napake pri prenosu in pretvorbi podatkov z merilnega mesta do nadzornega centra, napake zaradi pojava t. i. mehanizma »backfill« ipd. Poseben primer nepravilnih podatkov nastane ob izpadu električne energije ali pri komunikacijskih okvarah med oddaljenim terminalom in nadzornim centrom. V tem primeru ni več mogoč dostop do podatkov, zato veljajo za manjkajoče podatke. Možne napake se lahko pojavijo tudi v povezavi z merilnimi instrumenti. Izhajajo iz nenatančnosti merilnih naprav, ki običajno izvira iz neumerjenosti merilnikov, zato jih je običajno težje odkriti. Ustreznost sumljivih meritev, ki bi izhajale iz nenatančnosti merilnikov, se lahko preveri s pomočjo neke druge merilne naprave, ki bi bila nameščena v bližini obravnavanega merilnika. Operater sistema SCADA lahko v primeru prepoznav napak primerja delovanje vodovodnega sistema glede na časovni interval, ki je primerljiv s tistim ob napaki, in s tem dobi vpogled v možne hidravlične razmere. Priporočljiva pa je uporaba dobro umerjenega hidravličnega modela, saj lahko na podlagi njegovih preračunov ustvari boljši pregled nad delovanjem vodovodnega sistema. V vsakem primeru pa je nujno čim prej odpraviti vzrok napake in omogočiti nemoteno obratovanje.

2.3. Zasnova merilnega programa

Zasnova merilnega programa zahteva določitev merilnih mest, ki dajejo največ informacij o delovanju vodovodnega sistema. V praksi se najpogosteje izvaja po načelu »ad hoc«, kjer



se operater na podlagi svojega strokovnega znanja odloči, na katerih lokacijah bo namestil merilno opremo in meril izbrane veličine. Če merilna mesta niso optimalno izbrana, pridobljene meritve ne dajejo dovolj informacij za nadaljnjo obravnavo in nezadovoljivo prispevajo k reševanju izzivov (npr. iskanje vodnih izgub ipd.). Na ta način vložena sredstva niso bila učinkovito izrabljena. Strokovnjak si lahko pri zasnovi merilnega programa pomaga z naslednjimi vprašanji:

- a) katere hidravlične veličine opazovati (tlak, pretok ipd.),
- b) kje jih opazovati (vezano na lokacijo opazovanja),
- c) kdaj jih opazovati (odločitev glede na trajanje, stalnost in pogostost opazovanj),
- d) v kakšnih okoliščinah jih opazovati (izbor pravih hidravličnih obtežbenih primerov).

Odgovore na navedena vprašanja pod točkami (a), (c) in (d) mora predhodno podati inženir s svojim strokovnim znanjem, medtem ko je odgovor na vprašanje (b) optimizacijske narave. V točki (c) se postavlja vprašanje po časovni komponenti izvedbe merilnega programa. Odločamo se lahko med stalnimi ali začasnimi merilnimi mesti, ki imajo različne zasnove in seveda različno finančno težo.

Merilno območje, pogosto imenovano cona DMA (angl. District Metered Area), je zaključen del vodovodnega sistema, ki ima evidentiran vtok in/ali iztok vode v obravnavano merilno območje. Za cone DMA se običajno izvedejo stalna merilna mesta, ki se pogosto ujemajo z območji tlačne cone. Primeri, da cone DMA ustrezajo tlačnim conah, se najpogosteje pojavljajo pri vodovodnih sistemih, ki se nahajajo na zelo razgibanem terenu. Če se za cono DMA predvidi regulacija vstopnih tlakov, se takšna cona imenuje cona PMA (angl. Pressure Management Area).

Za določitev con DMA je treba upoštevati naslednje pogoje:

- Obstoj GIS-ov (s točnimi podatki) ali načrtov v merilu 1 : 500 ali 1 : 1000 obravnavanega območja. Izzivi lahko izhajajo iz nepopolnih podatkov o topologiji cevovodov, podrobnih podatkov o objektih, zapornih ventilih ipd.
- Cone DMA naj bi imele med 500 in 3000 priključkov, kar je odvisno od prevladujočega tipa odvzema vode.
- Cone DMA so lahko tudi industrijski kompleksi ali bolnišnice, pri čemer je število priključkov veliko manjše.
- Za vzpostavitev pilotne cone DMA je treba zagotoviti, da ima območje le en dotok vode.
- Merilni jašek, v katerem se bo nahajala merilna oprema, mora biti na vtoku v cono DMA. Če na lokaciji vtoka ni merilnega jaška, ga je treba zgraditi. V primeru obstoječega jaška pa je treba preveriti njegovo ustreznost.
- Da se preveri popolna izolacija cone DMA, je treba izvesti test ničelnega tlaka (angl. zero pressure test), kar je pomembno z vidika zagotavljanja pravilnega delovanja cone DMA.
- Vsi vodomerni števcji v coni DMA morajo biti natančno zavedeni, imeti morajo enoličen identifikator in status umerjenosti, ki je merilo za pravilnost meritev porabe uporabnikov.

Dodatno je treba pri izbiri lokacije merilnega jaška upoštevati naslednja priporočila:

- Merilni jašek se mora nahajati na območju, kjer ni možnosti vdora vode v jašek, in mora biti dovolj velik, da se lahko namesti vsa predvidena merilna oprema.
- Merilni jašek naj se nahaja v bližini električnega in telekomunikacijskega omrežja, da sta zagotovljena električni priklop in daljinski prenos podatkov do nadzornega centra.
- Mesto merilnega jaška naj bo zavarovano pred vandalizmom in krajo merilne opreme, torej ustrezno tehnično varovano, zato ne sme biti na slabo nadzorovanih območjih.
- Lokacija merilnega jaška naj bo dolvodno od morebitnih razbremenilnih prelivov in merjenih odvzemov vode.
- V primeru predvidene širitve poselitvenega območja mora biti merilni jašek gorvodno od predvidene lokacije priključitve novega območja na vodovodni sistem.
- Cev, na kateri je nameščen merilnik pretoka, mora biti ne glede na to, ali gre za stalno ali začasno namestitev, gor- in dolvodno na določeni dolžini brez lokalnih motenj, ki bi lahko povzročile neenakomerno turbulenco v merilnem odseku in s tem izrazito merilno napako.

Kot je bilo omenjeno, se poleg stalnih merilnih mest pogosto izvajajo meritve na začasnih merilnih mestih. Meritve in na njihovi podlagi pridobljene informacije, ki jih želimo pridobiti z začasnimi merilnimi mesti, so pogosto povezane s točno določenim namenom. Med te namene lahko spadajo študije za ugotavljanje koeficientov hrapavosti cevovodov, ugotavljanje hidravličnih karakteristik dotrajanih črpalk in regulacijskih ventilov, izdatnosti vodovodnega sistema kot hidrantnega omrežja, identifikacija rezidualnih koncentracij dezinfekcijskih sredstev ipd. Ponovno nam pomagajo na začetku tega podpoglavja našeta vprašanja, ki omogočajo uspešno zasnovo merilnega programa. Ker je ciljno raziskovanje z začasnimi merilnimi mesti običajno povezano z identifikacijo neznanih parametrov in procesov, ki se vršijo v vodovodnem sistemu, se njihovi rezultati uporabljajo predvsem v povezavi z modeliranjem teh procesov. Pri začasnih merilnih mestih torej ne gre toliko za nadzor delovanja vodovodnega sistema kot za samo umerjanje hidravličnih in drugih modelov, ki so nato uporabljeni v nadaljnjih modelih podpore odločanju (slika 1).

Motivacija v procesu umerjanja je izboljšati natančnost in stopnjo zaupanja v napovedi hidravličnega modela. Z optimizacijo izbora lokacij za vzpostavitev začasnih merilnih mest želimo maksimirati kakovost informacij, pridobljenih z meritvami, ki so nato uporabljene za umerjanje hidravličnega modela. Število meritev oziroma njihova informacijska vrednost ima velik vpliv na natančnost hidravličnega modela, večja informacijska vrednost pa daje tudi večjo stopnjo zaupanja v napovedi modela. Izbor merilnih mest je torej v tesni povezavi s cilji umerjanja. Posplošeno lahko rečemo, da so za identifikacijo določenega neznane parametra, ki ga želimo določiti, najprimernejše tiste lokacije merilnih mest, kjer ima sprememba neznane parametra največji vpliv na vrednosti merjenih hidravličnih veličin. Govorimo torej o občutljivostni oziroma senzitivnostni analizi potencialnih merilnih mest, pri čemer občutljivejša merilna mesta posledično dajejo več informacij o pravi vrednosti neznane parametra.

Po opredelitvi, katere hidravlične veličine bi opazovali, določitvi načina izvedbe meritev in ob kakšnih obtežbenih primerih bi se le-te zajele, je ključno vprašanje, kje izvesti meritve. Ta



optimizacijski problem izbora merilnih mest je treba obravnavati z dveh zornih kotov. Prvi vidik zajema minimiranje območja zaupanja v ocenjene vrednosti parametrov, kar je mogoče doseči s pridobivanjem čim večjega števila meritev. Drugi vidik pa zajema funkcijo stroškov, kjer je optimalno, da pridobimo želene meritve za ocenjevanje parametrov s čim manjšim številom merilnih mest. Optimiranje skupnih stroškov ob izvajanju merilnega programa je sestavljeno iz fiksnih stroškov (investicijski stroški opreme, stroški vzpostavitve merilnih mest na sistemu ipd.) in variabilnih stroškov (stroški dela, povezani z izvajanjem meritev, stroški vzdrževanja merilne opreme, stroški zavarovanja merilne opreme, stroški energetskih virov ipd.). Ker sta navedena vidika protislovna, je treba prepoznati tista merilna mesta, ki bodo hkrati zadovoljevala ciljno funkcijo natančnosti umerjanja kakor tudi stroškovni vidik izvajanja meritev. Po optimiziranem izboru merilnih mest za izvedbo meritev na vodovodnem sistemu nastopi postopek umerjanja neznanih parametrov hidravličnega modela.

3. MODELIRANJE, UMERJANJE IN KRITERIJI NATANČNOSTI UMERJANJA HIDRAVLIČNIH MODELOV VODOVODNIH SISTEMOV

Izraz »umerjanje« opisuje širok nabor postopkov, s katerimi se pri vseh oblikah modeliranja (tj. pri matematičnih in fizičnih modelih) zagotovi, da model ponazarja dejanske razmere v naravi ali na prototipu. Ena od natančnejših opredelitev umerjanja navaja, da je umerjanje postopek prilagajanja posameznih neznanih parametrov hidravličnega modela tako, da se minimizirajo razlike med meritvami, opravljenimi na realnem vodovodnem sistemu, in napovedmi hidravličnih veličin modela. Uredba o oskrbi s pitno vodo (Uradni list RS, 2012) predpisuje obveznost, da mora upravljavec javnega vodovodnega sistema zagotoviti občasno hidravlično modeliranje vodovodnega sistema. S hidravličnimi modeli je nato mogoče izvajati različne poizvedbe in analize, ki lahko odgovorijo na številna vprašanja: ali je obratovanje vodooskrbnega sistema ustrezno; kakšne bodo razmere ob širitvi sistema in vključevanju novih oskrbovalnih območij; kje se nahajajo območja s povečanim deležem vodnih izgub; kakšna je starost vode v omrežju; časovno sledenje vode iz posameznih virov; kolikšno je lahko znižanje stroškov oskrbe s pitno vodo ob optimizaciji obratovanja črpalk in drugih naprav ipd.

Zaupanje v pravilne vrednosti modelnih napovedi glede na realni vodovodni sistem je odvisno od stopnje negotovosti modeliranja. Sklepanje, da modelne napovedi ustrezno predstavljajo delovanje realnega sistema, je mogoče preveriti, če se modeliranje opravi za dogodke, ki so se že zgodili, meritve pa so bile opravljene z ustrezno merilno opremo, za katero je znana stopnja merilne negotovosti, ali pa so zbrana opazovanja o stanju na realnem vodovodnem sistemu, za katera pa je stopnja zanesljivosti treba tudi določiti. Na podlagi takšnih ugotovitev o obnašanju realnega sistema je mogoče ugotoviti, ali matematični model z vsemi svojimi spremenljivkami in parametri ustrezno predstavlja obnašanje opazovanega realnega sistema. Zaradi pomanjkanja oz. napak podatkov o realnem sistemu se pojavljajo negotovosti in posledično manjše zaupanje tudi v modelne napovedi. Vzroki za negotovost o pravih modelnih napovedih izhajajo iz kompleksnosti in velikega vira podatkov, ki opisujejo realni sistem. Prav tako pa lahko vir negotovosti predstavljata tudi (omejeno) teoretično znanje in pravilna numerična formulacija procesov v realnem sistemu.

Na področju modeliranja vodovodnih sistemov obstaja nekaj smernic, ki postavljajo meje umerjenosti in določajo, kakšna naj bo zadostna natančnost umerjanja in posledično natančnost modelnih napovedi. Water Research Center (WRC) je objavil numerične vrednosti, izražene tako v relativni kot absolutni obliki odstopanj med napovedmi modela in meritvami na vodovodnem sistemu, ki določajo stopnje umerjenosti tlakov in pretokov pri statičnih simulacijah, poleg omenjenega pa pri dinamičnih simulacijah obravnava tudi odstopanja pri gladinah v vodohranih. Vrednosti odstopanj tlakov in pretokov so odvisne od obsega meritev oziroma od tega, do kakšne mere smo pokrili možni nabor vseh meritev.

Smernice natančnosti umerjanja po WRC (1989) so:

- Napovedi modela: pretoki
 - ± 5 % odstopanja pretokov, če meritve obsegajo več kot 10 % vseh pretokov,
 - ± 10 % odstopanja pretokov, če meritve obsegajo manj kot 10 % vseh pretokov.
- Napovedi modela: tlaki
 - $\pm 0,5$ m oz. ± 5 % odstopanja tlakov, 85 % vseh meritev tlakov,
 - $\pm 0,75$ m oz. $\pm 7,5$ % odstopanja tlakov, 95 % vseh meritev tlakov,
 - $\pm 2,0$ m oz. ± 15 % odstopanja tlakov, 100 % vseh meritev tlakov.
- Napovedi modela: delovanje vodohranov (razširjena časovna simulacija – EPS)
 - ± 5 % odstopanja delovne prostornine vodohrana med dvema časovnima korakoma.

Naslednjo smernico je izdelalo združenje Engineering Computer Applications Committee (ECAC), ki se razlikuje glede na namen uporabe hidravličnih modelov. Podana so odstopanja za vrednosti tlakov in pretokov glede na namen in uporabo vrste hidravličnega modela (tabela 1).

Tabela 1: Smernica natančnosti umerjanja po ECAC (1999)

Uporaba modela	Raven podrobnosti	Tip modela	Št. meritev tlaka	Odstopanje tlakov	Št. meritev pretoka	Odstopanje pretokov
Dolgoročno planiranje	Nizka	SS ali EPS	10 % vozlišč	$\pm 3,5$ m za 100 % meritev	1 % cevi	± 10 %
Načrtovanje	Srednja do visoka	SS ali EPS	2 % - 5 % vozlišč	$\pm 1,4$ m za 90 % meritev	3 % cevi	± 5 %
Analiza obratovanja	Nizka do srednja	SS ali EPS	2 % - 10 % vozlišč	$\pm 1,4$ m za 90 % meritev	2 % cevi	± 5 %
Kakovost vode	Visoka	EPS	2 % vozlišč	$\pm 2,1$ m za 70 % meritev	5 % cevi	± 2 %

Oznake: SS = model stalnega toka (Steady-State); EPS = razširjena časovna simulacija (Extended Period Simulation).

Novejše in najpodrobnejše smernice so predstavili pri Haestad Methods, ki poznajo 11 kategorij uporabe hidravličnih modelov, za katere so podane zgornje in spodnje vrednosti odstopanj glede na velikost in kompleksnost cevovodnih sistemov (tabela 2). Kljub temu mejne vrednosti odstopanj niso strogo opredeljene, saj so odvisne tudi od kakovosti meritev. Hidravlični model naj bi bil v območju natančnosti meritev, s katerimi je bil umerjen.



Po končanem umerjanju na podlagi zbranih nizov meritev lahko umerjevalec hidravličnega modela potrdi delovanje in napovedi modela z dodatnim nizom meritev. Takšen postopek je znan kot validacija. Z validacijo se lahko ugotovijo pomanjkljivosti umerjenega modela v spremenjenih obtežnih pogojih in robnih pogojih. Pri preverjanju oziroma potrjevanju napovedi hidravličnega modela je treba robne pogoje delovanja cevovodnega sistema, kot so obtežbeni primeri porabe, izhodiščne vrednosti vodohranov in obratovalna pravila, prilagoditi hidravličnim razmeram, ob katerih so bile zbrane meritve.

4. UPORABA KRITERIJEV NATANČNOSTI PRI ANALIZI USPEŠNOSTI UMERJANJA REALNEGA VODOVODNEGA SISTEMA

Vodovodni sistem Šentvid oskrbuje s pitno vodo okoli 34.000 prebivalcev in nekaj industrijskih uporabnikov. Po podatkih iz obdobja izvajanja meritev se povprečna dnevna vrednost načrpane vode giblje med 90 in 110 l/s. Izvedene meritve na vodooskrbnem sistemu so vključevale 16 meritev tlakov in 4 meritve pretokov. Tlaki so bili vzorčeni z digitalnim merilnikom tlaka, katerega merilni razpon je 0–20 bar in merilna napaka $\pm 0,05$ % glede na maksimalno merilno vrednost.

Tabela 2: **Smernice natančnosti umerjanja hidravličnih modelov**

Namen analize	Kriterij	Obtežni primer	Hidr. model	Opomba
Splošno dolgoročno načrtovanje VS	H: $\pm 1,5$ do 3,0 m	Požarni odvzem	SS	⁽¹⁾ Na vodohranih
	G: $\pm 1,0$ do 2,0 m ⁽¹⁾	Norm. poraba ⁽¹⁾	EPS ^{(1) (2)}	⁽²⁾ Na črpalkah
	Q: ± 10 % do 20 % ⁽²⁾			
Dimenzioniranje cevovodov VS	H: $\pm 1,5$ do 3,0 m	Požarni odvzem	SS	⁽³⁾ Novi cevovod vpliva na vodohran
	G: $\pm 1,0$ do 2,0 m ⁽³⁾	Norm. poraba ⁽³⁾	EPS ⁽³⁾	
	Q: ± 10 % do 20 % ⁽³⁾			
Zagotavljanje vode za gašenje požarov	H: $\pm 1,5$ do 3,0 m	Požarni odvzem	SS	Na območjih VS, ki se jih analizira
Načrtovanje širitve VS	H: $\pm 1,5$ do 3,0 m	Požarni odvzem	SS	Na območju VS, ki se ga analizira
		Norm. poraba	EPS	
Ruralnih VS	H: $\pm 3,0$ do 6,0 m	Max. poraba	SS	Oddaljena mesta VS
		Norm. poraba		Ni vode za gašenje
Študije obnove VS	H: $\pm 1,5$ do 3,0 m	Požarni odvzem	SS	Na območju obnove VS
		Norm. poraba		
Izdatnosti hidrantov	Q: ± 10 % do 20 %	Požarni odvzem	SS	---
Študije porabe električne energije	E: ± 5 % do 10 %	Norm. poraba	EPS	⁽⁴⁾ Urna poraba
	E: ± 10 % do 20 % ⁽⁴⁾			⁽⁵⁾ Maks. Poraba
	E: ± 5 % do 10 % ⁽⁵⁾			
Obratovalnih težav VS	Ni podrobno definirano ujemanje	Izredne razmere	SS	---
			EPS	
Izredne razmere / okvare na VS	H: $\pm 3,0$ do 6,0 m	Izredne razmere	SS	---
			EPS	
Dezinfekcijskih reagentov	R: $\pm 0,1$ do 0,2 mg/l	Norm. poraba	EPS	---

Oznake: H = tlak; G = gladine v vodohranu; Q = pretok; R = koncentracije dezinfekcijskih reagentov; SS = model stalnega toka; EPS = razširjena časovna simulacija; VS = vodovodni sistem.

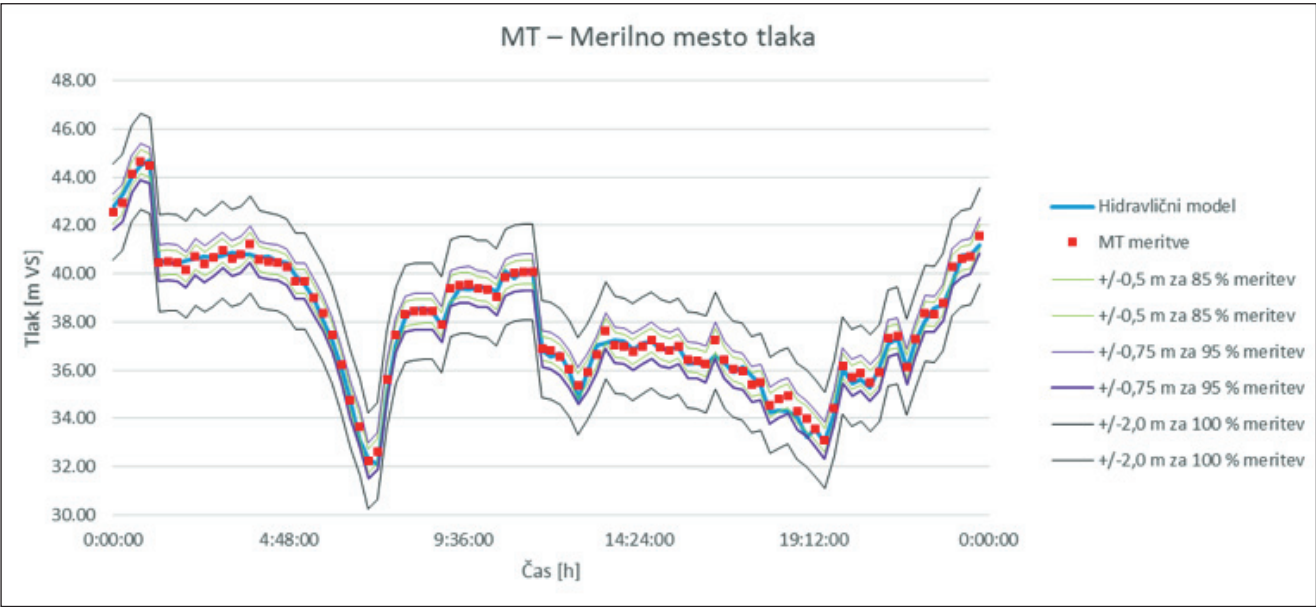
Vir: Walski in sod., 2003.

Vzorčenje meritev tlaka je bilo izvedeno na 10 sekund. Pretoki so bili merjeni z ultrazvočnimi merilci pretokov, kjer je bil merilni razpon povprečnih hitrosti od 0,006 do 14,89 m/s, merilna negotovost pa določena za dve območji, in sicer $\pm 2,0$ % pri hitrostih $v \geq 1$ m/s in $\pm 0,02$ m/s pri hitrostih $v < 1$ m/s (ISO-5168, 2005). Meritve pretoka so bile vzorčene na eno minuto. V obdobju izvajanja meritev je bilo opravljenih tudi 11 izpustov vode iz hidrantov. Meritve pri teh neodvisnih obtežnih primerih izpustov iz hidrantov so bile uporabljene pri umerjanju s simulacijami stalnega toka. V tem primeru so bili robni pogoji na objektih sistema povzeti kot dejansko stanje iz nadzornega centra. Umerjanje za primer razširjene časovne simulacije je bilo izvedeno z intervalom 15 minut. Zbrane meritve so bile v časovnih intervalih izbrane tako, da so ustrezale časovnim korakom hidravličnih simulacij.

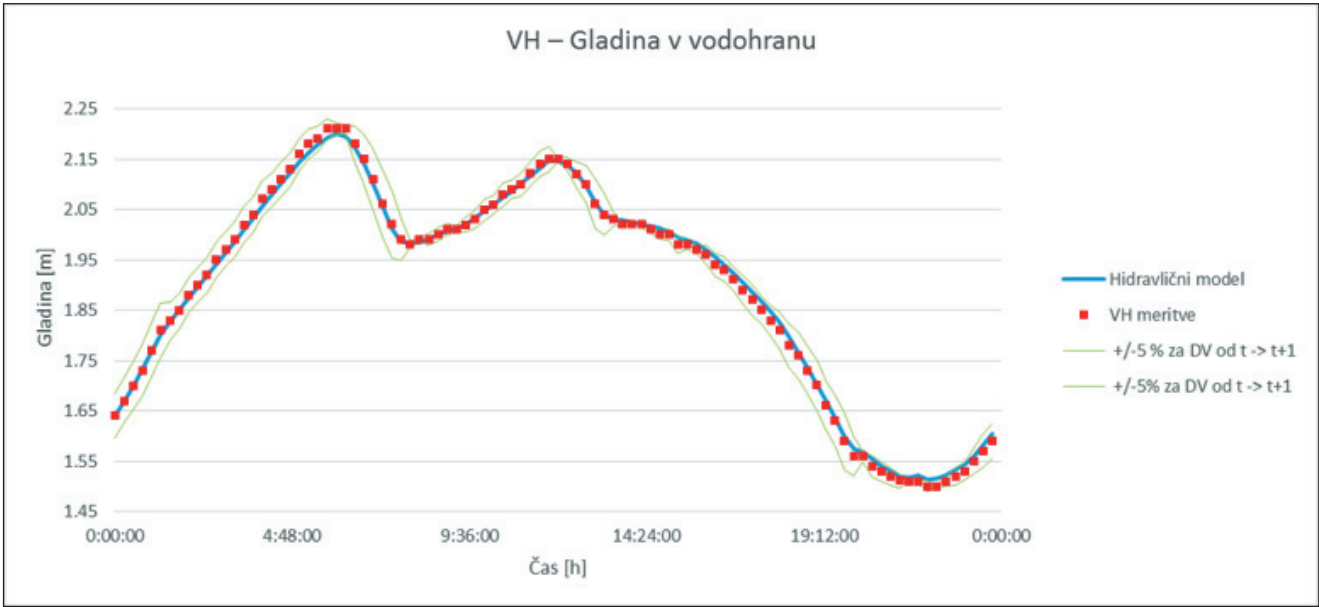
Za umerjanje 25 skupin hrapavosti cevovodov so bile na razpolago enodnevne meritve tlaka in pretoka, ki so pridobljene iz istih merilnih mest kot v prejšnjem poglavju. Za enodnevno hidravlično simulacijo, kjer je časovni korak nastavljen na 15 minut, imamo tako 96 obtežnih primerov. Skupaj je na razpolago 1536 meritev tlakov (16 merilnih mest * 96 obtežnih primerov), 864 meritev pretokov (9 merilnih mest * 96 obtežnih primerov) in 192 meritev tlakov (gladini dveh vodohranov), kar znaša 2592 meritev.

Umerjanje se je izvajalo z optimizacijskim metahevrstičnim algoritmom AMALGAM (Vrugt in Robinson, 2007). Na slikah 2–4 so grafi, ki prikazujejo po enega predstavnika umerjenih hidravličnih veličin, tj. tlaki, pretoki, gladine v vodohranih. Posamezni graf predstavlja raven umerjenosti na določenem merilnem mestu in izpolnjevanje kriterijev umerjanja. Raven kakovosti umerjanja je bila opazovana glede na smernico WRc (1989), ki postavlja tudi najstrožje kriterije umerjenosti v primerjavi z drugima dvema smernicama iz prejšnjega poglavja. Na grafih so tako predstavljeni rezultati hidravličnega modela (modra črta), meritve hidravličnih veličin (rdeče kocke) in kriteriji odstopanja po smernici WRc (1989). Na vsakem grafu so ti kriteriji različno prikazani, saj se razlikujejo glede na to, na katero hidravlično veličino se našajo.

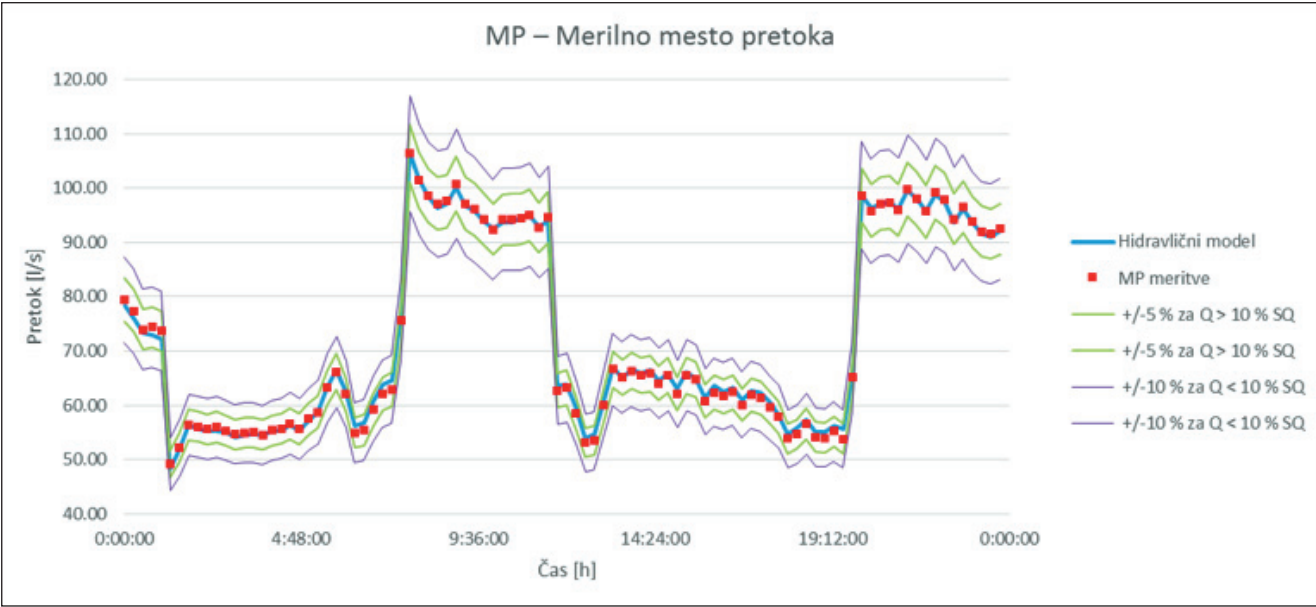
Slika 2 podaja primerjavo izračunanih in izmerjenih tlakov za izbrano merilno mesto. Ujemanje na tem merilnem mestu je zelo dobro, saj se vsi rezultati hidravličnega modela nahajajo znotraj najstrožjega kriterija, tj. $\pm 0,5$ m oz. ± 5 % odstopanja tlakov za več kot 85 % vseh meritev tlakov. Slika 3 prikazuje primerjavo izračunanih in izmerjenih tlakov za izbrano merilno mesto. Umerjanje je bilo tudi na tem merilnem mestu zelo dobro, saj ustreza kriteriju umerjanja, tj. ± 5 % odstopanja pretokov, če meritve obsegajo več kot 10 % vseh pretokov. Slika 4 pa prikazuje gibanje gladine v vodohranu. Na nivoju najvišjih in najnižjih gladin je opazno nekoliko manjše ujemanje modela in meritev, vendar tukaj le nekaj meritev izpade iz zahtevanega kriterija umerjanja, tj. ± 5 % odstopanja delovnega volumna vodohrana med dvema časovnima korakoma.



Slika 2: Primerjava izračunanih in izmerjenih tlakov za merilno mesto MT1 in primerjava s kriteriji umerjanja po WRc (1989)



Slika 4: Primerjava izračunanih in izmerjenih gladin v vodohranu in primerjava s kriterijem umerjanja po WRc (1989)



Slika 3: Primerjava izračunanih in izmerjenih pretokov za merilno mesto MP1 in primerjava s kriteriji umerjanja po WRc (1989)

Tabela 3: Povzetek uspešnosti umerjanja po smernici WRc (1989)

Veličina	Kriterij	Zahteve	Uspešnost [%]	Odstopanje
Tlaki	$H < \pm 0,5 \text{ m}$ (oz. $\pm 5 \%$)	> 85 % vseh meritev	94,2 %	Min: $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
	$H < \pm 0,75 \text{ m}$ (oz. $\pm 7,5 \%$)	> 95 % vseh meritev	99,6 %	Povp: 0,21 m
	$H < \pm 2,0 \text{ m}$ (oz. $\pm 15 \%$)	100 % vseh meritev	100%	Maks: 0,85 m
Pretoki	$Q < \pm 5 \%$	pri $Q > 10 \% \Sigma Q$	98,1 %	Min: $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$
	$Q < \pm 10 \%$	pri $Q < 10 \% \Sigma Q$	87,9 %	Povp: 0,37 l/s
Gladine	$\pm 5 \% \Delta V_{(t,t+1)}$	---	85,4 %	Min: 0,0 m
				Povp: 0,01 m
				Maks: 0,03 m

Oznake: H = tlak; G = gladina v vodohranu; Q = pretok.

Tabela 3 povzema celoten postopek ujemanja in podaja pregled nad vsemi merilnimi mesti. Pri pregledu skupne analize umerjanja glede na kriterije WRc (1989) lahko opazimo, da se tlaki v celoti nahajajo znotraj navedenih kriterijev. Analiza umerjanja pretokov je zelo uspešna pri večjih vrednostih pretokov, medtem ko je pri manjših količinah nekoliko nižja. Podobno ujemanje, kot ga izkazuje umerjanje pri manjših pretokih, je bilo doseženo tudi pri umerjanju nivojev gladin v vodohranih.

5. ZAKLJUČEK

Umerjanje hidravličnih modelov vodovodnih sistemov ima v sistemu upravljanja javne go-
spodarske infrastrukture, njenega načrtovanja, razvoja in obratovanja pomembno vlogo, saj
vzpostavlja zaupanje v odločitve, ki se sprejemajo na podlagi napovedi posameznih hidravlič-

nih modelov. Zato je treba pri orodjih za podporo odločanju, kamor spadajo hidravlični modeli, oceniti stopnjo negotovosti oziroma zagotoviti čim večjo istovetnost z razmerami v realnih vodooskrbnih sistemih. Hidravlični modeli omogočajo numerične simulacije delovanja realnega vodovodnega sistema. Namen hidravličnega modela je znatno vplivati tudi na sam proces umerjanja, saj namen določa, katere parametre modela je treba podrobneje umeriti in kakšna mora biti natančnost napovedi modela glede na dejansko stanje cevovodnega sistema. Šele po preverbi umerjenosti parametrov in preverbi modelnih napovedi lahko hidravlični model štejemo za umerjenega. Opisani postopek je bil prikazan na praktičnem primeru, s podanimi kriteriji umerjanja in smernicami. Rezultati umerjanja so bili analizirani na podlagi smernice WRc (1989), ki je od treh predstavljenih smernic najstrožja. Iz analize je mogoče sklepati, da je bilo umerjanje uspešno. Tako umerjen hidravlični model se lahko z visoko stopnjo zaupanja uporablja v nadaljnjih hidravličnih analizah.

LITERATURA IN VIRI

1. Bicik, J., Kapelan, Z., Makropoulos, C., Savic, D.: Pipe burst diagnostics using evidence theory. *Journal of Hydroinformatics*, 13(4), 596–608. London (VB): IWA Publishing, 2011.
2. ECAC: Calibration Guidelines for Water Distribution Modelling. *Proceedings AWWA 1999 ImTech Conference*, 1-17. ZDA: American Water Works Association, 1999.
3. Hall, J. W.: Handling uncertainty in the hydroinformatic process. *Journal of Hydroinformatics*, 5, 215–232. London (VB): IWA Publishing, 2003.
4. Hutton, C., Kapelan, Z., Vamvakieridou-Lyroudia, L., Savic, D.: Dealing with Uncertainty in Water Distribution System Models: A Framework for Real-Time Modeling and Data Assimilation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(2), 169–183. ZDA: ASCE, 2014.
5. ISO-5168: Measurement of fluid flow – Procedures for evaluation of uncertainties. Ženeva (CH): International Organization for Standardization (ISO), 2005.
6. Loaiciga, H. A., Charbeneau, R. J., Evertt, L. G., Fogg, G. E., Hobbs, B. F., & Rouhani, S.: Review of Ground-Water Quality Monitoring Network Design, *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(1), 11-37. ZDA: ASCE, 1992.
7. Martinez, F., Hernandez, V., Alonso, J. M., Rao, Z. F., Alvisi, S.: Optimizing the operation of the Valencia water-distribution network. *Journal of Hydroinformatics*, 9(1), 65–78. London (VB): IWA Publishing, 2007.
8. Uredba o oskrbi s pitno vodo. Uradni list RS, št. 88/2012.
9. Vrugt, J., Braak, C., Clark, M., Hyman, J., Robinson, B.: Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. *Water resources research*, 44, 1-15. Hoboken (ZDA): John Wiley & Sons, 2008.
10. Walski, T. M., in sod.: *Advanced Water Distribution Modelling and Management*. Waterbury (ZDA): Hae-sted Press, 2003.
11. Water Research Center (WRc): *Network Analysis - A Code of Practice*. Swindon (VB): WRc, 1989.