

Primljen / Received: 10.7.2017.

Ispravljen / Corrected: 27.10.2017.

Prihvaćen / Accepted: 24.11.2017.

Dostupno online / Available online: 10.5.2018.

Procjena nosivog kapaciteta vodnih resursa otoka Cresa

Autori:



Marin Kuspilić, mag. ing. aedif.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
mkuspilic@grad.hr



Prof.dr.sc. **Živko Vuković**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
vukovic@grad.hr



Doc.dr.sc. **Ivan Halkijević**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
halkijevic@grad.hr

Prethodno priopćenje

Marin Kuspilić, Živko Vuković, Ivan Halkijević

Procjena nosivog kapaciteta vodnih resursa otoka Cresa

Nosivi kapacitet vodnih resursa (NKVR) predstavlja maksimalni broj osoba (stanovnika) koje mogu neograničeno obitavati na nekom području, koristeći se pritom dostupnim obnovljivim vodnim resursima. NKVR se može primijeniti prilikom procjene održivosti te prilikom radnji vezanih uz gospodarenje i strateško planiranje. Podaci potrebni za procjenu NKVR često su nedovoljno pouzdani ili stohastičke naravi. Primjenom analize osjetljivosti i neodređenosti moguće je na temelju nepouzdanosti ulaznih podataka odrediti pouzdanost dobivene procjene. Ovaj rad sadrži procjenu NKVR otoka Cresa primjenom prethodno spomenute metode.

Ključne riječi:

nosivi kapacitet vodnih resursa, analiza neodređenosti, Monte Carlo simulacija, analiza osjetljivosti

Preliminary report

Marin Kuspilić, Živko Vuković, Ivan Halkijević

Assessment of water resources carrying capacity for the Island of Cres

Water resources carrying capacity (WRCC) is defined as the maximum number of persons (inhabitants) that can be sustained without limitation in a given area, using available renewable water resources. WRCC can be used in sustainability assessments and in the management and strategic planning activities. Data needed for WRCC assessment are often imprecise or stochastic in nature. Sensitivity and uncertainty analysis can be used to quantify reliability of assessment based on imprecision of input data. WRCC assessment for the Island of Cres, based on the above mentioned method, is presented in the paper.

Key words:

water resources carrying capacity, uncertainty analysis, Monte Carlo simulation, sensitivity analysis

Vorherige Mitteilung

Marin Kuspilić, Živko Vuković, Ivan Halkijević

Beurteilung der tragenden Kapazität der Wasserressourcen der Insel Cres

Die tragende Kapazität der Wasserressourcen (TKWR) stellt die maximale Anzahl an Personen (Einwohner) dar, die unbegrenzt auf einem Gebiet ansässig sein können, unter Nutzung der verfügbaren erneuerbaren Wasserressourcen. Die TKWR kann bei der Einschätzung der Nachhaltigkeit sowie bei Handlungen in Bezug auf das Management und die strategische Planung angewendet werden. Die für die Beurteilung der TKWR benötigten Daten sind häufig nicht ausreichend zuverlässig oder von stochastischer Natur. Durch Anwendung der Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse ist es möglich, die Zuverlässigkeit der erhaltenen Einschätzungen anhand der Unzuverlässigkeit der Eingangsdaten zu ermitteln.

Schlüsselwörter:

tragende Kapazität der Wasserressourcen, Unsicherheitsanalyse, Monte Carlo Simulation, Sensitivitätsanalyse

1. Uvod

1.1. Koncept nosivog kapaciteta vodnih resursa

Pristup dovoljnoj količini vode zadovoljavajuće kvalitete jedan je od ključnih preduvjeta ljudskog opstanka i njegova daljnjeg razvoja. Dostupnost vode može značajno utjecati na dobrobit društva te predstavljati ograničavajući faktor njegovog napretka. Ovim radom proučava se odnos količine dostupnih vodnih resursa i maksimalnog broja stanovnika koji može održivo koristiti te resurse. Maksimalno dopušteni broj stanovnika koji može održivo koristiti dostupne vodne resurse naziva se nosivi kapacitet vodnih resursa (NKVR).

Nedostatak dovoljne količine vode obično ima značajan utjecaj na gotovo sve ljudske aktivnosti, pa NKVR predstavlja izrazito važnu sastavnicu procjene održivosti. Većina dostupnih metoda procjene NKVR-a može se ugrubo podijeliti u dvije grupe. Prva grupa procjena bazirana je na kompleksnim determinističkim modelima, poput dinamike sustava, prema [1, 2], a druga je grupa bazirana na probabilističkom pristupu, prema [3]. Primjena probabilističkih metoda najčešće predstavlja prikladniji pristup rješavanju problematike vezane uz gospodarenje prirodnim resursima [4], pa će taj pristup biti zastupljen u ovom radu.

1.2. Motivacija za probabilistički pristup procjeni NKVR

Podaci potrebni za navedenu procjenu, poput količine i intenziteta oborina, količine vode u podzemnom vodonosniku, stupnja evapotranspiracije te potrošnje vode svih kategorija potrošača, vrlo su često nedovoljno poznati ili stohastičkog karaktera. Srednje (prosječne) vrijednosti većine parametara su često znane, ali su praćene značajnim stohastičkim odstupanjima od srednje vrijednosti, zbog čega se vrijednost navedenih parametara vrlo rijetko može procijeniti s točnošću koja bi rezultirala pouzdanom determinističkom vrijednosti NKVR-a.

Pristup procjeni NKVR-a baziran je na analizi osjetljivosti i neodređenosti, kako bi se prethodno navedene nepouzdanosti mogle uzeti u obzir prilikom procjene. Predložena metoda bazira se na Monte Carlo simulaciji, kojom se može izračunati razdioba vjerojatnosti vrijednosti NKVR-a. Razmatranjem nepouzdanosti promatranog sustava, model može prikazati raspon mogućih ishoda, te se navedena informacija u konačnici može koristiti u procesu gospodarenja vodnim resursima. Analizom osjetljivosti mogu se prepoznati parametri koji imaju najveći utjecaj na nepouzdanost procjene.

1.3. Područje odabrano za analizu

Otok Cres, najveći hrvatski otok, predstavlja područje odabrano za procjenu NKVR. Otok je smješten u sjevernom dijelu Jadranskog mora, ukupne kopnene površine 405,8 [km²]. Prema popisu stanovništva iz 2011., otok Cres je imao 3079 stanovnika

[5]. Tijekom turističke sezone (čiji vrhunac se najčešće dostiže u srpnju i kolovozu) nerijetko se ukupan broj stanovnika dvostruko poveća, pa i više.

Vodoopskrba otoka Cres u potpunosti se oslanja na oborine. Oborine koje padnu na područje otoka dijelom se slijevaju u Vransko jezero, što predstavlja jedino izvorište na otoku. Količina oborina te potražnja za vodom (potrošnja vode) imaju izražene sezonske varijacije. Ljetni periodi su uglavnom sušni te praćeni povećanom potražnjom za vodom, izazvanom boravkom turista na otoku. Vodoopskrba otoka se pri ovakvim uvjetima nalazi pod značajnim pritiskom. Podatak o maksimalno dopuštenom broju stanovnika koji osigurava održivost u pogledu korištenja vodnih resursa (tj. NKVR) može značajno pripomoći i olakšati aktivnosti prostornog planiranja te gospodarenja vodnim resursima, ako je održivost cilj navedenih aktivnosti. Otok Cres, Vransko jezero (plava boja), veća naselja i popularne turističke destinacije te cjevovodi postojećeg vodoopskrbnog sustava (plave crtkane linije) prikazani su na slici 1.



Slika 1. Otok Cres

2. Metode

2.1. Izračun NKVR

Količina vode iz dostupnih izvorišta te mogućnost zahvaćanja i skladištenja spomenute količine vodnog resursa predstavljaju dvije komponente koje određuju nosivi kapacitet [6]. Dostupna količina vode na promatranom području (iz dostupnih izvorišta) predstavlja veličinu na koju nije moguće utjecati tehnološkim mjerama. Retencijska sposobnost područja (sposobnost skladištenja vode), s druge strane, može se uvelike izmijeniti ljudskim intervencijama u prirodni okoliš. Imajući na umu prethodno navedenu činjenicu, provedena su dva izračuna (scenarija) NKVR. Dva navedena scenarija se međusobno razlikuju u veličini retencijskog prostora koji može skladištiti oborine. Retencijski prostor obuhvaća prirodne (npr. jezera) i umjetne retencije (akumulacije).

Ovim istraživanjem dana je samo preliminarna procjena NKVR; izračun je proveden primjenom jednostavnih izraza hidrološkog bilanciranja. Premda je predložena analiza relativno jednostavna, omogućuje niz korisnih informacija.

2.1.1. Scenarij 1

Prvim scenarijem opisano je trenutačno stanje; pretpostavljeno je da su oborine jedino izvorište vode na otoku, tj. onaj dio oborina koji pada na sliv Vranskog jezera. Vransko jezero jedini je retencijski prostor na otoku koji se može koristiti za vodoopskrbu. NKVR ovog scenarija izračunan je prema izrazu:

$$NKVR_1 = \frac{10^3(1-c_n) \sum_{i=1}^{12} H_i A_V}{\sum_{i=1}^{12} \frac{D_i}{(1-c_{t,i})}} \quad (1)$$

gdje je:

- NKVR₁ - nosivi kapacitet vodnih resursa za scenarij 1 [stanovnik]
- c_n - koeficijent prirodnih gubitaka
- c_{t,i} - mjesečni koeficijent tehničkih gubitaka
- H_i - mjesečna visina oborine [mm]
- A_V - površina sliva Vranskog jezera [km²]
- D_i - mjesečna potrošnja vode po stanovniku [m³stanovnik⁻¹mjesec⁻¹]

Oborine koje se mogu iskoristiti za vodoopskrbu samo su djelić od ukupne količine vode koja u obliku oborina završi na otoku. Veći se dio oborina procesom evaporacije i evapotranspiracije vraća u atmosferu, zatim procesom infiltracije ponire u tlo ili izravno otječe u more. Dio oborina koji nije zahvaćen tim procesima, te se može iskoristiti za vodoopskrbu, u modelu je izračunan uvođenjem *koeficijenta prirodnih gubitaka*, c_n. Taj koeficijent predstavlja postotak oborine koji se ne može koristiti za vodoopskrbu, tj. dio koji se „izgubi” tijekom spomenutih procesa. O njegovim očekivanim vrijednostima bit će više riječi poslije (poglavlje 3.3.4.).

Gubici vode koji se pojavljuju u procesu zahvaćanja, transporta i distribucije vode mogu se izračunati uvođenjem *koeficijenta tehničkih gubitaka*, c_t. Očekivane vrijednosti koeficijenta c_t bit će iskazane poglavljem 3.3.3.

2.1.2. Scenarij 2

Druga proračunska situacija predstavlja idealizirani scenarij kod kojeg se uvodi pretpostavka da sve oborine koje padnu na površinu otoka (umanjene za iznos *prirodnih gubitaka*) čime ukupnu količinu vode dostupnu za vodoopskrbu. Pretpostavlja se da postoji dovoljni volumen retencijskog prostora u kojem se voda može skladištiti tijekom godine te koristiti po potrebi. NKVR ovog scenarija izračunan je izrazom (2).

$$NKVR_2 = \frac{10^3(1-c_n) \sum_{i=1}^{12} H_i A_C}{\sum_{i=1}^{12} \frac{D_i}{(1-c_{t,i})}} \quad (2)$$

gdje je:

- A_C - tlocrtna površina otoka Cres [km²]
- NKVR₂ - nosivi kapacitet vodnih resursa scenarija 2 [stanovnik].

Ukupni dodatni retencijski volumen potreban za osiguravanje vodoopskrbe prema broju stanovnika izračunanog izrazom (2) može se odrediti na temelju izraza (3) i (4). Dodatni retencijski volumen ne uključuje retencijski prostor sliva Vranskog jezera.

$$\Delta W_i = 10^3(1-c_{n,i})H_i A_C - WRCC_2 \frac{D_i}{(1-c_{t,i})} \quad (3)$$

$$V = \left(1 - \frac{A_V}{A_C}\right) \left(\max\{\Delta W_1, \dots, \Delta W_{12}\} - \min\{\Delta W_1, \dots, \Delta W_{12}\}\right) \quad (4)$$

gdje je:

- ΔW_i - mjesečna razlika u količini dostupne vode na otoku generirane oborinama (umanjene za prirodne gubitke) te vode potrošene radi zadovoljavanja potrebe stanovništva [m³]
- V - dodatni retencijski volumen (uz Vransko jezero) potreban za skladištenje vode s ciljem osiguravanja vodoopskrbe [m³]

2.2. Monte Carlo simulacija

Većina varijabli koje se koriste u izrazima (1) do (4) stohastičke su naravi (obično praćene i značajnom raspršenošću) ili se njihove vrijednosti ne mogu dovoljno precizno odrediti. Spomenuta neodređenost kvantificira se definiranjem prikladnih distribucija vjerojatnosti ulaznim veličinama. Neodređenost ulaznih veličina napreduje kroz predloženi model, pa stoga i rezultat postaje neodređena veličina kojoj se naknadno pridodaje distribucija vjerojatnosti.

Monte Carlo simulacijom nasumično se odabiru vrijednosti ulaznih varijabli (vodeći pritom računa o distribuciji vjerojatnosti

ulaznih veličina), nakon čega se izračunava NKVR na temelju izraza (1) i (2). Nasumičan odabir ulaznih veličina te naknadni izračun provedeni su 200.000 puta, čime je dobiveno mnoštvo mogućih rezultata $NKVR_1$ i $NKVR_2$. Dobivenim rezultatima pridodane su prikladne distribucije vjerojatnosti njihovih vrijednosti.

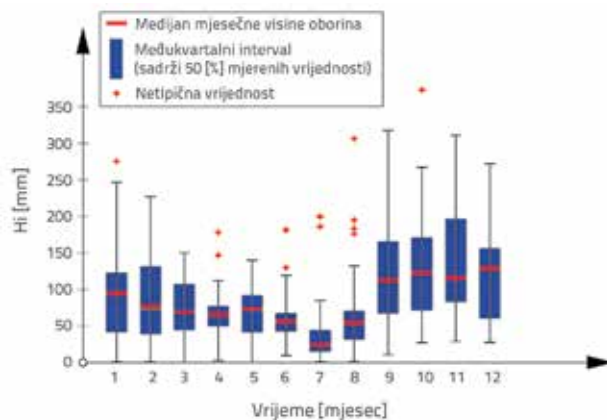
Broj provedenih simulacija utječe na točnost dobivenog rezultata; veći broj simulacija povećat će pouzdanost procjene, ali i vrijeme potrebno računalu za izračun. U konačnici su prikazani rezultati dobiveni na osnovi 200.000 simulacija, što se pokazalo kao optimalno rješenje. Ponovljeni izračuni s tako odabranim brojem simulacija davali su grupe vrijednosti $NKVR_1$ i $NKVR_2$ koje se nisu međusobno bitno razlikovale, i to uz relativno kratko potrebno vrijeme izračuna. Manji broj simulacija je rezultirao značajnijim razlikama među ponovljenim izračunima, dok veći broj simulacija nije rezultirao primjetnim povećanjem točnosti izračuna.

2.3. Određivanje distribucija vjerojatnosti ulaznih podataka

Ovo potpoglavlje sadrži opis i prikaz odabranih distribucija vjerojatnosti ulaznih podataka.

2.3.1. Oborine

Podaci o oborinama prikupljeni su od Državnog hidrometeorološkog zavoda za razdoblje od 1978. do 2014. godine [7]. Na slici 2. prikazana je mjesečna neravnomjernost u količini oborina, kao i pokazatelji raspršenosti izmjerenih vrijednosti. Lako se može uočiti velika raspršenost mjerenih podataka u jesenskim i zimskim mjesecima, kao i velike razlike u količini oborina između mjeseci u ljetnom periodu te jesenskom/zimskom periodu.



Slika 2. Kvartilni dijagram (box plot) prikazanih mjesečnih oborina [mm/mjesec]

U tablicama koje slijede svaki će se mjesec označavati s pripadnim brojem; siječanj je označen brojem 1, veljača brojem 2, itd.

Sredina, medijan i standardna devijacija mjerene količine oborina izračunani su i prikazani u tablici 1., te je uz navedene podatke dan i naziv distribucije vjerojatnosti koja je odabrana za prikaz raspršenosti vrijednosti. Sve odabrane distribucije vjerojatnosti su pozitivno asimetrične.

2.3.2. Potrošnja vode

Ukupna potrošnja vode određena je na temelju podataka dobivenih od lokalnog komunalnog poduzeća [7]. Prosječna godišnja potrošnja vode po stanovniku iznosi $D = 6,48 [m^3 \text{ stanovnik}^{-1} \text{ mjesec}^{-1}] = 228 [l \text{ stanovnik}^{-1} \text{ d}^{-1}]$. Naravno, vrijednosti godišnje potrošnje vode po stanovniku variraju od godine do godine te se, uz pretpostavku da su izmjerene vrijednosti normalno distribuirane, može izračunati standardna

Tablica 1. Statističke mjere i odabrane distribucije mjesečnih oborina

Mjesec	Srednja vrijednost [mm]	Medijan [mm]	Standardna devijacija [mm]	Odabrana distribucija
1	95,5	96,2	68,7	Rayleigh
2	85,7	76,6	59,6	Weibull
3	75,8	70,4	43,3	Log-logistička
4	68,7	65,7	34,0	Log-logistička
5	68,6	74,5	38,1	Gamma
6	61,8	56,2	37,7	Log-logistička
7	38,9	24,2	45,3	Log-logistička
8	66,8	55,1	64,4	Gamma
9	125,8	113,2	87,0	Gamma
10	130,9	124,2	77,1	Rayleigh
11	145,2	116,7	84,6	Weibull
12	119,6	130,1	62,1	Gamma
Cijela godina	1083,2	1026,6	234,7	-

devijacija godišnje potrošnje po stanovniku; ona iznosi 1,26 [m³ stanovnik⁻¹ mjesec⁻¹].

Vrijednost D je, dakle, za potrebe provedbe izračuna NKVR odabrana kao normalno distribuirana slučajna varijabla sa srednjom vrijednosti 6,48 [m³ stanovnik⁻¹ mjesec⁻¹] i standardnom devijacijom 1,26 [m³ stanovnik⁻¹ mjesec⁻¹].

Obradom podataka opažene su i značajne mjesečne promjene u ukupnoj potrošnji vode. Uzete su u obzir u izračunu uvođenjem koeficijenta mjesečne neravnomjernosti, $c_{D,i}$, koji izražava koliko je puta mjesečna potrošnja vode veća ili manja od srednje godišnje vrijednosti. Vrijednosti koeficijenta $c_{D,i}$ prikazane su na slici 3. Može se uočiti da je tijekom kolovoza potrošnja dvostruko, pa i više, veća od prosječne godišnje vrijednosti.

Vrijednosti srednjih mjesečnih potrošnji vode po stanovniku, koje se koriste za izračun NKVR, određuju se prema izrazu (5)

$$D_i = c_{D,i} D \quad (5)$$

gdje je:

D_i - mjesečna potrošnja vode po stanovniku [m³stanovnik⁻¹mjesec⁻¹]

$c_{D,i}$ - koeficijent mjesečne neravnomjernosti

D - prosječna godišnja potrošnja vode po stanovniku [m³stanovnik⁻¹mjesec⁻¹]

2.3.3. Gubici vode prilikom zahvaćanja, transporta i distribucije vode (tehnički gubici)

Podatke o gubicima vode, koji su nastali prilikom zahvaćanja, transporta i distribucije vode, također je prikupilo nadležno komunalno poduzeće [7]. Takvi će se gubici u ovom radu nazvati tehnički gubici.

Tehnički gubici izraženi su u obliku postotka, te predstavljaju količinu vode koja je zahvaćena na Vranskom jezeru, ali ne uspijeva doći do predviđenog potrošača, već se izgubi curenjem na raznim mjestima na postojećem vodoopskrbnom sustavu. Srednja godišnja vrijednost koeficijenta tehničkih gubitaka iznosi $c_t = 0,43 = 43\%$. Iznos godišnje vrijednosti ukupnih tehničkih gubitaka također varira od godine do godine. Pretpostavljeno je da skup podataka o vrijednosti koeficijenta slijedi normalnu distribuciju, pa je koeficijent tehničkih gubitaka, c_t , u model uvršten kao normalno distribuirana slučajna varijabla sa srednjom vrijednošću 0,43 (43%) te standardnom devijacijom 0,075 (7,5%).

Jednako kao i u prethodnom poglavlju 2.3.2., uveden je koeficijent mjesečne neravnomjernosti tehničkih gubitaka, $c_{tc,i}$, čija je zadaća kvantificirati mjesečnu varijabilnost navedenih gubitaka. Mjesečna varijabilnost koeficijenta $c_{tc,i}$ inverzna je mjesečnoj varijabilnosti koeficijenta $c_{D,i}$, kao što se može vidjeti na slici 3. Mjesečna vrijednost koeficijenta tehničkih gubitaka izračunava se izrazom (6).

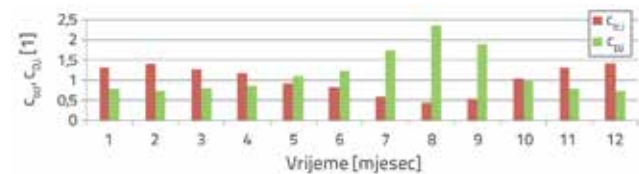
$$c_{t,i} = c_{tc,i} c_t \quad (6)$$

gdje je:

$c_{t,i}$ - mjesečni koeficijent tehničkih gubitaka

$c_{tc,i}$ - koeficijent mjesečne neravnomjernosti tehničkih gubitaka.

c_t - srednja godišnja vrijednost koeficijenta tehničkih gubitaka



Slika 3. Mjesečne vrijednosti koeficijenata $c_{D,i}$ i $c_{tc,i}$

2.3.4. Gubici izazvani evapotranspiracijom, infiltracijom i otjecanjem u more (prirodni gubici)

Značajna količina vode koja u obliku oborina dolazi na površinu otoka ponire u krško podzemlje (infiltracija), njome se koriste biljke u procesu evapotranspiracije, isparava s površine Vranskog jezera te ostalih vodnih tijela (evaporacija) ili otječe u more. Gubici vode izazvani tim procesima nazivat će se *prirodni gubici*.

Otok Cres karakterizira razvijen krški teren, što rezultira velikim stupnjem infiltracije. Velika količina oborina koja padne na površinu otoka se otjecanjem po površini ili podzemnim krškim kanalima i pukotinama slijeva u more. Proces evapotranspiracije nužan je za održavanje stabilnosti okoliša, te se količina vode utrošena na njega može smatrati količinom vode koja je potrebna za postizanje održivosti prirodnog okoliša. Evaporacija s Vranskog jezera rezultira velikim gubicima vode, pogotovo u ljetnom razdoblju; količina vode koja godišnje izravno padne na sliv Vranskog jezera manja je od godišnje količine koja ispari s površine jezera [8].

Gubici izazvani svim prethodno navedenim procesima (prirodni gubici) u matematičkim su izrazima prikazani uvođenjem koeficijenta prirodnih gubitaka. Prijašnjim pokušajima hidrološkog bilanciranja Vranskog jezera utvrđeno je kako je gotovo sva voda koja u obliku oborina dopijeva na sliv jezera (više od 95%) "izgubljena", tj. prirodni gubici iznose više od 95%. Uz tu procjenu vezan je visok stupanj nepouzdanosti, pa će se ovom parametru pridodati veći raspon mogućih vrijednosti. Koeficijent prirodnih gubitaka, c_p , bit će u izračunima iskazan kao ujednačeno distribuirana slučajna varijabla unutar intervala [0,7;0,99]. Jednostavnije rečeno, količina prirodnih gubitaka se predviđa u intervalu od 70 do 99%.

2.3.5. Sliv Vranskog jezera

Topografski sliv Vranskog jezera iznosi 25 km² [8]. Uzevši u obzir kršku geologiju i topografiju otoka, može se s dovoljnom sigurnošću pretpostaviti da je sliv veći od navedenog; postoji mogućnost da se podzemnim pukotinama i kanalima oborinska voda odvodi do jezera iz područja koje ne odgovara topografskom slivu [9]. Bez dodatnih dostupnih informacija, za svrhu izračuna

veličina je sliva Vranskog jezera u modelu definirana kao ujednačeno distribuirana slučajna varijabla između vrijednosti 25 km² i 50 km².

2.4. Izračun indeksa osjetljivosti

Analiza osjetljivosti je skup metoda i alata kojima se kvantificira utjecaj neodređenosti ulaznih veličina u modelu na nepouzdanost dobivenog rezultata [10]. Indeksi osjetljivosti predstavljaju mjere kojima se određuje utjecaj navedenih neodređenosti ulaznih parametara na nepouzdanost rezultata. Dvije su vrste indeksa osjetljivosti korištene prilikom izračuna NKVR: indeksi prvog reda te indeksi ukupnog učinka. Metodu proračuna objiju vrsta indeksa pronašao je Saltelli sa suradnicima [11]. Obje vrste indeksa zapravo su alati u metodi analize osjetljivosti pod imenom globalna analiza osjetljivosti bazirana na varijanciji. Navedeni indeksi mogu kvantificirati koliki je udio varijancije dobivenog rezultata uzrokovan varijancijom svakog od ulaznih parametara. Drugim riječima, indeksi mogu dati informaciju o tome do koje mjere je raspršenost dobivenog rezultata uzrokovana raspršenošću svakog od ulaznih parametara.

Indeks prvog reda predstavlja mjeru u kojoj varijancija pojedinog ulaznog parametra utječe na varijanciju rezultata, ne promatrajući pritom utjecaj interakcija pojedinog ulaznog parametra s varijabilnošću preostalih ulaznih veličina. Indeks ukupnog utjecaja predstavlja opsežniju mjeru utjecaja varijabilnosti pojedine ulazne veličine na varijabilnost rezultata, jer uzima u obzir i utjecaj međusobne interakcije promatranog parametra s preostalim ulaznim veličinama. Oba indeksa treba izračunati kako bi se mogla dobiti kvalitetna informacija o veličini utjecaja pojedinih ulaznih parametara na NKVR.

2.5. Ograničenja modela

Kao što je već prije napomenuto, predložena metoda se može smatrati preliminarnom procjenom NKVR-a. Metoda se osniva

na Monte Carlo simulacijama, pa se javlja potreba za velikim brojem računalnih izračuna. Kako bi se smanjilo vrijeme potrebno za izračun, primijenjen je pojednostavljen izraz za izračun NKVR-a. Unatoč pomalo grubom pojednostavljenju, taj izraz ipak kvantificira najvažnije utjecaje vezane uz hidrološke procese (koji određuju količinu dostupne vode), postupak zahvaćanja i distribucije vode te njezine potrošnje.

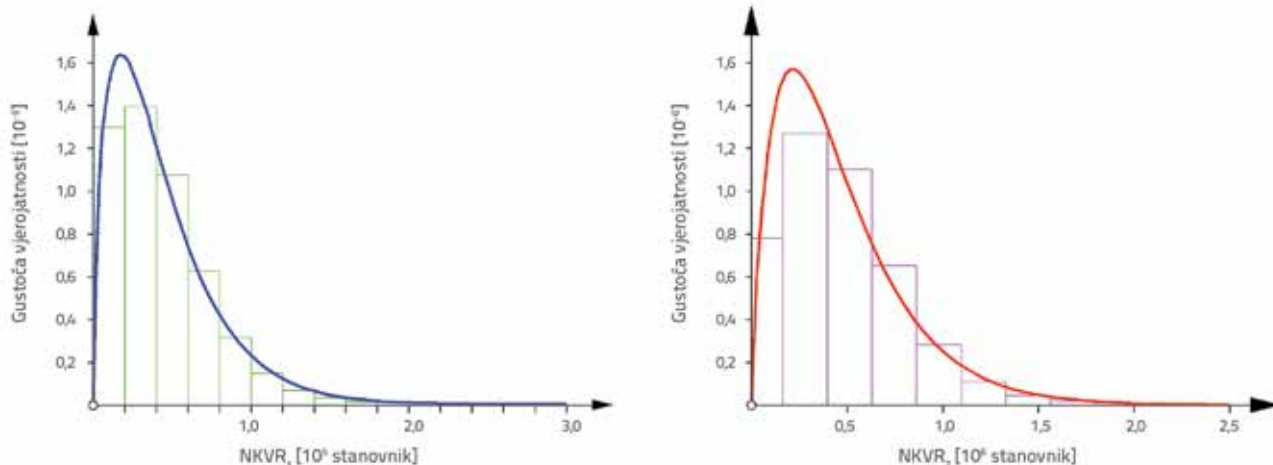
Analiza osjetljivosti je uključena u model procjene NKVR-a kako bi se mogli utvrditi daljnji koraci u istraživanju, ocijeni li se da pojednostavljanje modela uzrokuje neprihvatljivo veliku raspršenost rezultata. Ako neki od parametara, koji je uveden s namjerom da pojednostavni složeni proces (poput koeficijenta prirodnih gubitaka, c_n), ima velik utjecaj na raspršenost dobivene vrijednosti NKVR-a, može se, po potrebi, pristupiti daljnjem istraživanju procesa i izradi složenijega modela navedenog procesa, čime bi se mogla povećati pouzdanost procjene. S druge strane, ako se pokaže da promatrani parametar nema velik utjecaj na raspršenost rezultata, može se izbjeći primjena zahtjevnijih modela.

Izračun NKVR₁ (scenarij postojećeg stanja vodoopskrbe) proveden je pod pretpostavkom da su oborine koje se slijevaju u Vransko jezero sigurno izvorište za potrebe opskrbe vodom. Povećanje srednjih godišnjih temperatura zraka tijekom proteklih desetljeća uzrokovalo je povećano isparavanje s površine jezera te snižavanje razine vode u jezeru [9]. Ako bi se to nastavilo, postoji mogućnost (koja nije razmatrana u modelu) da će prodiranje slane vode u jezero kroz krško podzemlje učiniti vodu u jezeru neprikladnom za vodoopskrbu stanovništva.

3. Rezultati

3.1. Rezultati analize neodređenosti

Prikaz rezultata analize neodređenosti, dobivenih na temelju 200.000 Monte Carlo simulacija, dan je na slici 4. Na lijevoj dijelu slike 4. prikazana je razdioba vjerojatnosti NKVR₁, tj. razdioba vjerojatnosti nosivog kapaciteta vodnih resursa koji



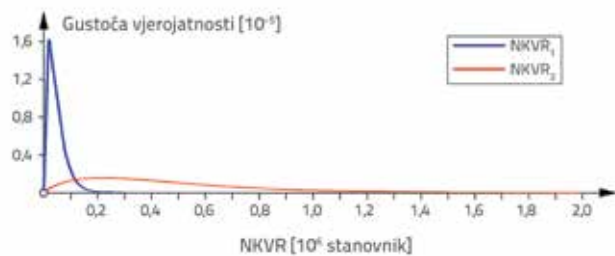
Slika 4. Distribucije vjerojatnosti NKVR₁ i NKVR₂

odgovara postojećem stanju vodoopskrbe (gdje jedino izvorište vode za potrebe vodoopskrbe je Vransko jezero). Distribucija vjerojatnosti je asimetrična, a najučestalije vrijednosti provedenih izračuna iznose oko od 20.000 stanovnika.

Desni dio slike 4. prikazuje razdiobu vjerojatnosti $NKVR_2$, tj. razdiobu vjerojatnosti nosivog kapaciteta vodnih resursa u najpovoljnijem, idealiziranom, vodoopskrbnom rješenju (bar s aspekta zahvaćanja što veće količine vode). Ovakvim rješenjem pretpostavljeno je da sva količina vode koja u obliku oborina padne na površinu otoka, umanjena za prirodne gubitke, uspijeva biti zahvaćena i uskladištena te iskorištena za potrebe vodoopskrbe. Primjena takvog rješenja podrazumijeva izvedbu velikog broja akumulacija.

$NKVR_2$ znatno je veći od $NKVR_1$. Distribucija vjerojatnosti $NKVR_2$ također je asimetrična, te se rezultati dobiveni izračunom najčešće pojavljuju u intervalu od 150.000 do 300.000 stanovnika.

Na osnovi slike 4. moglo bi se zaključiti da su razdiobe vjerojatnosti $NKVR_1$ i $NKVR_2$ vrlo slične, premda, kad bi se razdiobe istodobno prikazale (slika 5.), mogla bi se primijetiti znatna razlika u njihovoj raspršenosti. $NKVR_2$ karakterizira mnogo veća raspršenost od $NKVR_1$.



Slika 5. Usporedba distribucija vjerojatnosti $NKVR_1$ i $NKVR_2$

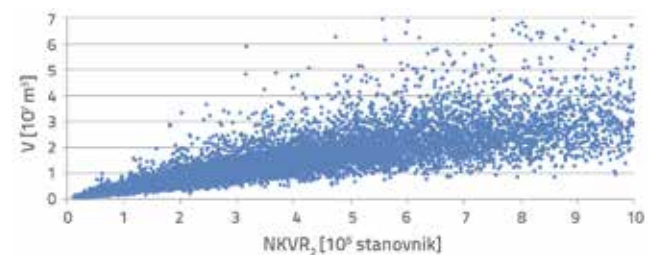
Dosada su navedene vrijednosti $NKVR$ -a koje se najčešće javljaju kao rezultati izračuna. Te vrijednosti ne predstavljaju vrstu podataka suviše korisnu za potrebe ocjene održivosti. Korisnije bi bilo razmotriti podatke koji su u stanju kvantificirati vjerojatnost dugoročnog opstanka stanovnika na otoku.

Medijan $NKVR_1$ iznosi 37.020 stanovnika. Ako bi sve to stanovništvo obitavalo na otoku, svake druge godine (u prosjeku) dolazilo bi do nestašice vode. Kada bi broj stanovnika na otoku iznosio 2.713 (što predstavlja vrijednost koja odgovara prvom percentilu distribucije vjerojatnosti $NKVR_1$), do nestašice vode dolazilo bi u prosjeku samo jednom tijekom perioda od sto godina. Vrijednosti $NKVR_1$ i $NKVR_2$ koje odgovaraju karakterističnim vrijednostima percentila prikazane su u tablici 2., gdje se može vidjeti odnos predviđenog broja stanovnika na otoku i vjerojatnosti pojave nestašice vode.

Uz navedene proračune proveden je i izračun dodatnog potrebnog volumena retencijskog prostora (uz Vransko jezero) koji treba omogućiti vodoopskrbu otoka pod pretpostavkom da broj stanovnika iznosi $NKVR_2$. Rezultati su prikazani na slici 6. u obliku dijagrama raspršenosti.

Tablica 2. Vrijednosti percentila distribucije $NKVR_1$ i $NKVR_2$

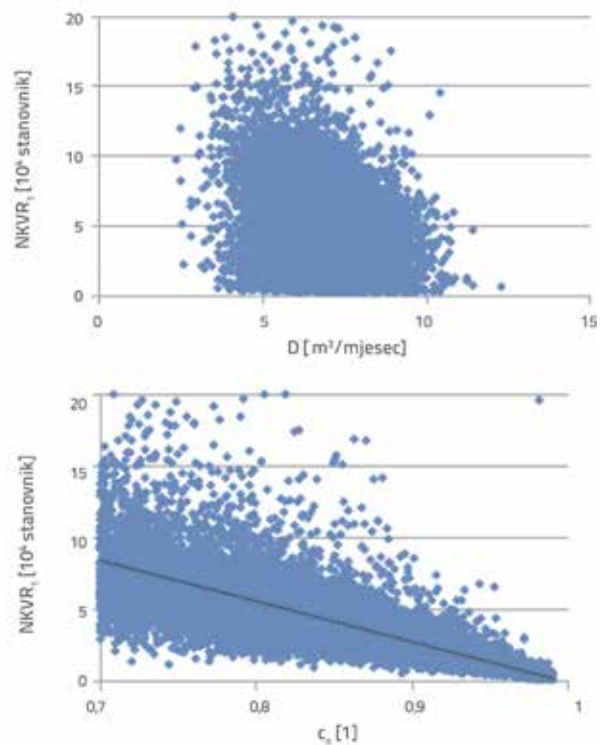
Percentil	$NKVR_1$ (stanovnik)	$NKVR_2$ (stanovnik)
1	2,713	30,955
2	3,516	40,123
5	5,698	63,919
10	9,058	102,210
50 (medijan)	37,020	412,370



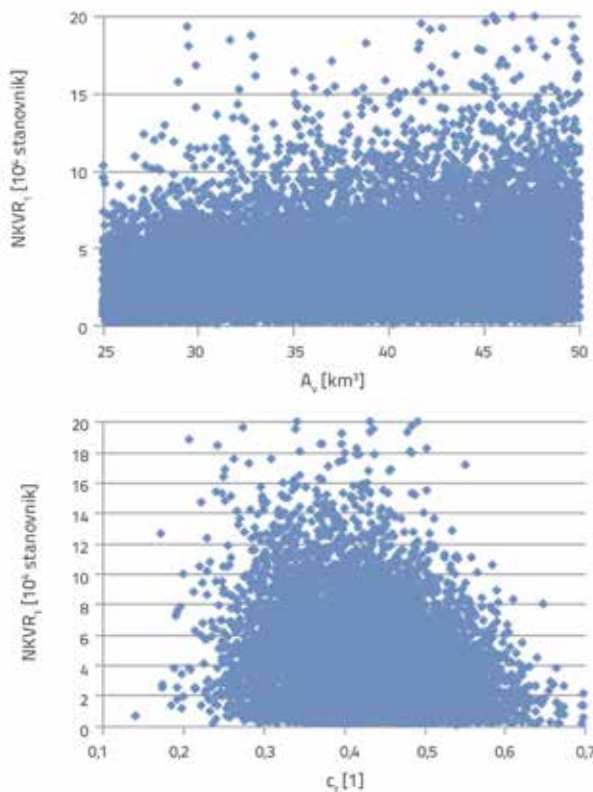
Slika 6. Dijagram raspršenosti dodatno potrebnog akumulacijskog volumena u ovisnosti o $NKVR_2$

3.2. Rezultati analize osjetljivosti

Analiza osjetljivosti provedena je kako bi se identificirali najutjecajni čimbenici nepouzdanosti procjene $NKVR$ -a. Iz dijagrama raspršenosti, prikazanih na slikama 7. i 8., može se vidjeti kako promjena vrijednosti pojedinog parametra utječe na raspršenost rezultata (u ovom slučaju, na $NKVR_1$).



Slika 7. Dijagrami raspršenosti parametara D i c_n u odnosu na $NKVR_1$



Slika 8. Dijagrami raspršenosti parametara A_c i c_t u odnosu na $NKVR_1$

Rezultate izračuna $NKVR_2$ karakterizira gotovo isto ponašanje promjene raspršenosti uzrokovano promjenom vrijednosti

pojedinih parametara kao i ono zabilježeno kod $NKVR_1$. Zato su u radu dani samo grafički prikazi rezultata $NKVR_1$.

Na slikama 7. i 8. prikazano je kako promjena vrijednosti četiriju parametara utječe na raspršenost rezultata; srednje godišnje potrošnje vode (D), koeficijenta prirodnih gubitaka (c_n), koeficijenta tehničkih gubitaka (c_t) te površine sliva Vranskog jezera (A_c). Vrijednosti navedenih parametara karakterizira nepouzdanost većinski vezana uz nedostatak mjerenja. Dodatnim istraživanjem može se smanjiti raspon mogućih vrijednosti, tj. povećati točnost procjene tih parametara. Količinu oborina, s druge strane, karakterizira nepouzdanost vezana uz stohastičku narav procesa, pa se raspršenost mogućih vrijednosti ne može značajno smanjiti dodatnim mjerenjima ili istraživanjima.

Na dijagramima raspršenosti može se vidjeti da svi prikazani parametri, osim c_n , imaju vrlo slab utjecaj na promjenu raspršenosti rezultata. Koeficijent prirodnih gubitaka, c_n , predstavlja jedinu veličinu koja značajnije utječe na promjenu raspršenosti $NKVR$ -a.

Izračunane su vrijednosti indeksa osjetljivosti kako bi se kvantificirao utjecaj svakog parametra korištenog u procjeni $NKVR_1$ i $NKVR_2$ na njihovu neodređenost, te su dobivene vrijednosti prikazane u tablici 3.

Kvantificiran je utjecaj svakog od parametara na raspršenost $NKVR_1$ i $NKVR_2$, te na vrijednost dodatnog retencijskog volumena (V) potrebnog za osiguravanje vodoopskrbe stanovništva čija veličina iznosi $NKVR_2$. Iz priložene se tablice vidi da na promjenu raspršenosti rezultata od svih parametara najviše utječu visine oborina u ožujku i srpnju te koeficijent c_n .

Tablica 3. Indeksi osjetljivosti

Parametar	Indeksi prvog reda			Indeksi ukupnog učinka		
	$NKVR_1$	$NKVR_2$	V	$NKVR_1$	$NKVR_2$	V
Visina oborina u siječnju, H_1	0,0034	0,0052	0,0023	0,2752	0,4162	0,5307
Visina oborina u veljači, H_2	0,0014	0,0027	0,0009	0,2737	0,4150	0,5301
Visina oborina u ožujku, H_3	0,2532	0,2770	0,5314	0,4614	0,5507	0,6512
Visina oborina u travnju, H_4	0,0002	0,0014	0,0010	0,2733	0,4145	0,5302
Visina oborina u svibnju, H_5	0,0005	0,0018	0,0006	0,2734	0,4146	0,5300
Visina oborina u lipnju, H_6	0,0010	0,0024	0,0016	0,2734	0,4147	0,5304
Visina oborina u srpnju, H_7	0,2803	0,3158	0,4811	0,6542	0,7284	0,8668
Visina oborina u kolovozu, H_8	0,0013	0,0028	0,0007	0,2735	0,4148	0,5302
Visina oborina u rujnu, H_9	0,0033	0,0051	0,0013	0,2749	0,4161	0,5303
Visina oborina u listopadu, H_{10}	0,0015	0,0029	0,0011	0,2738	0,4151	0,5302
Visina oborina u studenom, H_{11}	0,0029	0,0042	0,0017	0,2744	0,4157	0,5305
Visina oborina u prosincu, H_{12}	0,0016	0,0031	0,0010	0,2738	0,4150	0,5302
Veličina sliva Vranskog jezera, A_c	0,0291	0,0001	0,0005	0,3479	0,4137	0,5307
Prirodni gubici vode, c_n	0,2153	0,2549	0,0311	0,4814	0,6087	0,6448
Tehnički gubici vode, c_t	0,0164	0,0205	0,0006	0,3051	0,4351	0,5301
Jedinična potrošnja vode, D	0,0306	0,0368	0,0006	0,3489	0,4731	0,5300
Zbroj indeksa	0,8420	0,9363	1,0576	5,3384	7,3613	9,0565

4. Zaključak

Nosivi kapacitet vodnih resursa otoka Cresa procijenjen je metodom prikazanom u ovom radu, baziranom na analizi neodređenosti i osjetljivosti. Distribucije vjerojatnosti NKVR-a su izračunane, pa na temelju dobivenih podataka može jednostavno odrediti vjerojatnost pojave nestašice vode s obzirom na broj stanovnika koji obitava na otoku.

Procjena NKVR-a je provedena za dva slučaja: za postojeće stanje vodoopskrbe (NKVR₁) te za scenarij gdje se uvodi pretpostavka da sve oborine koje padnu na površinu otoka, umanjene za prirodne gubitke, predstavljaju količinu vode koja se može zahvatiti, uskladištiti i iskoristiti za potrebe vodoopskrbe (NKVR₂). Drugi izračunani slučaj je obrađen kako bi se mogla procijeniti maksimalna teoretski moguća (makar, s praktičnog aspekta, nedostižna) vrijednost NKVR. NKVR₂ otprilike je 10 puta veći od NKVR₁, te se u rezultatima

navodi i prikaz dodatnog retencijskog volumena potrebnog za osiguranje vodoopskrbe stanovnika jednakom NKVR₂.

Provedenom analizom osjetljivosti prikazano je da parametri koje karakterizira stohastička narav (oborine) najviše utječu na raspršenost NKVR-a. Opsežnija i temeljitija istraživanja, bi povećala pouzdanost parametara poput potrošnje vode, površine sliva Vranskog jezera te iznos tehničkih i prirodnih gubitaka, povećala bi i pouzdanost provedene procjene, premda ne značajno, jer je većina raspršenosti rezultat utjecaja stohastičkih parametara, tj. oborina. Predložena metoda rezultira podacima koji svoju svrhu mogu pronaći u raznim aktivnostima, poput prostornog planiranja i gospodarenja vodnim resursima. Rezultati analize neodređenosti mogu se koristiti za grubu procjenu NKVR-a otoka, a rezultati analize osjetljivosti mogu biti pomoć u definiranju prioriteta daljnjeg istraživanja jer daju podatke o najvećim izvorima nepouzdanosti rezultata.

LITERATURA

- [1] Wang, S., Xu, L., Yang, F., Wang, H.: Assesment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model, *Science of the Total Environment*, 472 (2014), pp. 1070-1081, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.115>
- [2] Dou, M., Ma, J., Li, G., Zuo, Q.: Measurement and assessment of water resources carrying capacity in Henan province, China, *Water Science and Engineering*, pp. 1-12, 2015.
- [3] Liu, R., Sun, C., Han, Z., Chen, L., Huang, Q., Chen, Y., Gao, S., Shen, Z.: Water environmental capacity calculation based on uncertainty analysis: a case study in the Baixi watershed area, China, *Procedia Environmental Sciences*, 13 (2012), pp. 1728-1738, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.166>
- [4] Uusitalo, L., Leihikoinen, A., Helle, I., Myrberg, K.: An overview of methods to evaluate uncertainty of deterministic models in decision support, *Environmental Modelling and Software*, 63 (2015), pp. 24-31, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.017>
- [5] Statistički ljetopis Republike Hrvatske, Državni zavod za statistiku, pp. 47., 2015.
- [6] Lane, M.: The development of a carrying capacity assessment model for the Australian socio-environmental context, PhD thesis, Queensland University of Technology, 2014.
- [7] Nacrt studije izvodljivosti vodoopskrbe i odvodnje aglomeracije Cres, Martinšćica, Mali Lošinj i Veli Lošinj, Hidroing d.o.o., 2016.
- [8] Ozanic, N.: Hydrological model of Vrana lake on the island of Cres, PhD thesis, Faculty of Civil Engineering, University of Split, 1996.
- [9] Bonacci, O.: Analiza varijacija razine vode jezera Vrana na otoku Cresu, *Hrvatske vode*, pp. 337-346, 2014.
- [10] Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M., Tarantola, S.: Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index, *Computer Physics Communications*, 2 (2010), pp. 259-270, <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>
- [11] Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., Tarantola, S.: *Global Sensitivity Analysis: The Primer*, Wiley, pp. 164-167, 2008.