

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.36>

## Procjena nosivog kapaciteta vodnih resursa primjenom analize neodređenosti i osjetljivosti

Marin Kuspilić

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet  
kontakt: [mkuspilic@grad.hr](mailto:mkuspilic@grad.hr)

### Sažetak

Nosivi kapacitet vodnih resursa (NKVR) predstavlja maksimalni broj osoba (stanovnika) koje mogu neograničeno obitavati na nekom području, koristeći pritom dostupne vodne resurse. NKVR svoju primjenu nalazi u aktivnostima procjene održivosti te prilikom radnji vezanih uz prostorno planiranje i gospodarenje vodnim resursima. Podaci potrebni za izradu procjene NKVR često su nedovoljno pouzdani ili stohastičke naravi. Primjenom analize neodređenosti moguće je na temelju spoznaje o neodređenosti ulaznih podataka odrediti nepouzdanost dobivene procjene. Analizom osjetljivosti moguće je kvantificirati utjecaj neodređenosti ulaznih veličina na nepouzdanost dobivene procjene. U ovom radu je, pomoću prethodno navedenih metoda, dana procjena nosivog kapaciteta vodnih resursa otoka Cresa uz prikaz utjecaja parametara korištenih u proračunu na nepouzdanost dobivenog rezultata.

**Ključne riječi:** nosivi kapacitet vodnih resursa, analiza osjetljivosti, analiza neodređenosti, Monte Carlo simulacija, gospodarenje vodnim resursima

## Assessment of water resources carrying capacity using uncertainty and sensitivity analyses

### Abstract

The water resources carrying capacity (WRCC) is defined as the maximum size of human population that can be sustained by natural environment, given its available water resources. It is most commonly used in sustainability assessment, land planning and water management activities. The data required for the WRCC assessment are usually insufficiently accurate or have stochastic features. The uncertainty analysis takes into account uncertainty of input data in order to determine reliability of an assessment. The sensitivity analysis is able to quantify the effect the uncertainty of input data has on reliability of assessment. An approach based on previously mentioned methods is used in this paper. Based on this approach, the water resources carrying capacity of the island of Cres is calculated, and the effect the parameters used in the assessment have on the calculated result is presented.

**Keywords:** water resources carrying capacity, sensitivity analysis, uncertainty analysis, Monte Carlo simulation, water resources management

## 1 Uvod

### 1.1 Koncept nosivog kapaciteta vodnih resursa

Nosivi kapacitet vodnih resursa (NKVR) predstavlja veličinu kojom se određuje brojnost ljudske populacije koja može opteretiti promatranu regiju s obzirom na dostupne vodne resurse. Za njegovo određivanje potrebno je odrediti količinu dostupnih obnovljivih vodnih resursa te potrošnju navedenih resursa uzrokovanu ljudskim potrebama (aktivnostima) te potrebama ekosustava.

Nedostatak dovoljne količine vode obično ima značajan utjecaj na gotovo sve ljudske aktivnosti i zato je NKVR izrazito važna sastavnica procjene održivosti. Većina dostupnih metoda procjene NKVR mogu se ugrubo smjestiti u dvije grupe. Prva grupa procjena bazirana je na kompleksnim determinističkim modelima, poput dinamike sustava [1], a druga na probabilističkom pristupu [2]. U ovom radu primijenjene su probabilističke metode.

### 1.2 Predloženi pristup proračunu

Podaci potrebni za navedenu procjenu, poput količine oborina, stupnja evapotranspiracije, te potrošnje vode svih kategorija potrošača vrlo su često nedovoljno poznati ili stohastičkog karaktera. Vrlo rijetko se ovi parametri mogu procijeniti s točnošću koja bi rezultirala pouzdanom determinističkom vrijednošću NKVR.

Pristup procjene NKVR baziran na analizi osjetljivosti i neodređenosti primjenjen je u ovom radu kako bi se prethodno navedene neodređenosti mogle uzeti u obzir (kvantificirati) prilikom izrade procjene.

### 1.3 Opis lokacije

Otok Cres, najveći hrvatski otok, predstavlja područje odabrano za procjenu NKVR. Prema popisu stanovništva iz 2011., na otoku se nalazi 3079 stalnih stanovnika [5]. Tijekom turističke sezone (čiji vrhunac se najčešće dostiže u srpnju i kolovozu) broj turista nerijetko nadmaši broj stalnog stanovništva, pri čemu ukupan broj stanovnika na otoku premaši više nego dvostruki iznos stalnog stanovništva.

Vodoopskrba otoka Cresa u potpunosti se oslanja na oborine. Dio oborina koje padnu na područje otoka slijevaju se 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 značajnim priljevom turista na otok. 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.

## 2 Metoda proračuna

### 2.1 Analitički izraz za proračun NKVR

Ovim radom dana je samo preliminarna procjena NKVR. Proračun je proveden prema jednostavnom izrazu koji, na temelju podataka o količini dostupne vode generirane oborinama, o potrošnji vode te o pojednostavljenim pokazateljima gubitaka vode, daje traženu vrijednost. NKVR je izračunan prema izrazu:

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

gdje su:

NKVR - nosivi kapacitet vodnih resursa [stanovnik],  $c_n$  - koeficijent prirodnih gubitaka,  $c_{t,i}$  - mjesečni koeficijent tehničkih gubitaka,  $H_i$  - godišnja količina oborine [mm],  $A_V$  - površina sliva Vranskog jezera [km<sup>2</sup>],  $D_i$  - mjesečna potrošnja vode po stanovniku [m<sup>3</sup>stanovnik<sup>-1</sup>mjesec<sup>-1</sup>].

Dio oborine koji se može iskoristiti za vodoopskrbu predstavlja samo djelić od ukupne količine vode koja u obliku oborine završi na otoku. Veći dio oborine se izgubi procesima evaporacije, transpiracije, infiltracije te otjecanjem u more. Dio oborine koji preostaje, te se može iskoristiti za vodoopskrbu, u modelu je izoračunan uvođenjem *koeficijenta prirodnih gubitaka*,  $c_n$ . Taj koeficijent predstavlja postotak oborine koji se ne može koristiti za vodoopskrbu, tj. dio koji se "izgubi" prethodno navedenim procesima. Gubici vode koji se pojavljuju u procesu zahvaćanja, transporta i distribucije vode proračunom se uzimaju u obzir uvođenjem *koeficijenta tehničkih gubitaka*,  $c_t$ .

### 2.2 Analiza neodređenosti i Monte Carlo pristup

Većina varijabli koje se koriste u izrazu (1) stohastičke su naravi (obično praćene i značajnom raspršenošću) ili se njihove vrijednosti ne mogu dovoljno precizno odrediti. Spomenuta neodređenost kvantificira se transformiranjem svakog od korištenih parametara u slučajnu varijablu s pripadnom distribucijom vjerojatnosti temeljem dostupnih mjerenih podataka o traženim parametrima [4].

Monte Carlo simulacijom nasumično se odabiru vrijednosti ulaznih varijabli (vodeći pritom računa o distribuciji vjerojatnosti ulaznih veličina), nakon čega se izračunava NKVR. Nasumičan odabir ulaznih veličina te naknadni proračun provedeni su 200.000 puta, čime je dobiveno mnoštvo mogućih rezultata.

Neodređenost ulaznih veličina se propagira kroz predloženi model, zbog čega i traženi rezultat (NKVR) postaje neodređena veličina kojoj se naknadno pridodaje distribucija vjerojatnosti.

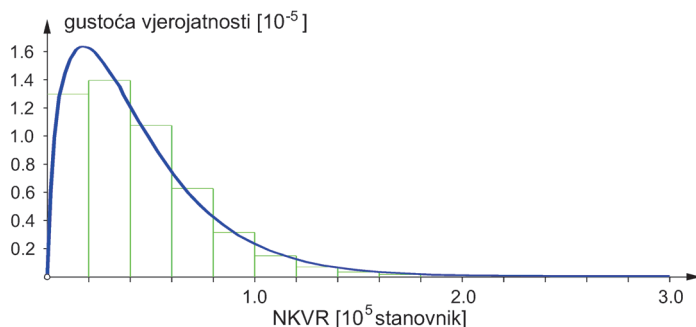
### 2.3 Analiza osjetljivosti

Analiza osjetljivosti predstavlja skup metoda i alata kojima se kvantificira utjecaj neodređenosti ulaznih veličina u modelu na nepouzdanost dobivenog rezultata. *Indeks osjetljivosti ukupnog učinka* [6] predstavlja odabranu mjeru kojom će se odrediti utjecaj navedenih neodređenosti ulaznih parametara na nepouzdanost rezultata. Navedeni indeks daje informaciju o tome do koje je mjere raspršenost dobivenog rezultata uzrokovana raspršenošću svakog od ulaznih parametara.

## 3 Rezultati

### 3.1 Rezultati analize neodređenosti

Prikaz rezultata analize neodređenosti dan je na slici 1., gdje je prikazana razdioba vjerojatnosti  $NKVR_x$ , tj. razdioba vjerojatnosti nosivog kapaciteta vodnih resursa koji odgovara postojećem stanju vodoopskrbe (gdje jedino izvorište vode za potrebe vodoopskrbe predstavlja Vransko jezero).



Slika 1. Distribucija vjerojatnosti NKVR otoka Cresa

Distribucija vjerojatnosti je asimetrična, a najučestalije vrijednosti se nalaze oko vrijednosti od 20.000 stanovnika. Navedene vrijednosti ne predstavljaju vrstu podataka dovoljno korisnu za potrebe ocjene održivosti. Korisnije je razmotriti podatke koji su u stanju kvantificirati vjerojatnost dugoročnog opstanka stanovnika na otoku.

Medijan NKVR iznosi 37.020 stanovnika. Ako bi navedeni broj stanovnika obitavao na otoku, svake bi druge godine (u prosjeku) dolazilo do nestašice vode. Kada bi broj

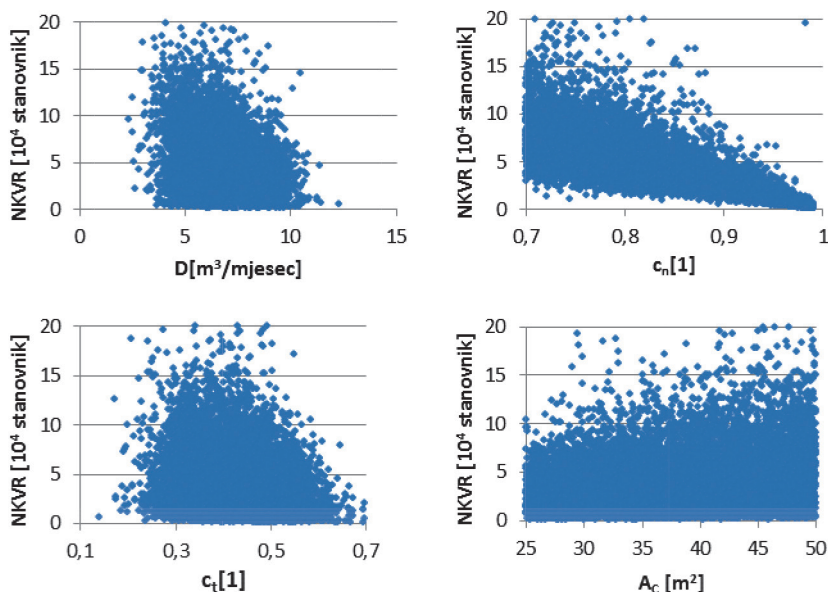
stanovnika na otoku iznosio 2.713 (što predstavlja vrijednost koja odgovara prvom percentilu distribucije vjerojatnosti NKVR), do nestašice vode bi dolazilo u prosjeku samo jednom tijekom perioda od sto godina. Vrijednosti NKVR koje odgovaraju karakterističnim vrijednostima percentila prikazane su u tablici 1., gdje se može vidjeti međusobna zavisnost predviđenog broja stanovnika na otoku i vjerojatnosti pojave nestašice vode.

Tablica 1. Percentili NKVR otoka Cres

Percentil	1	2	5	10	50 (medijan)
NKVR [stanovnik]	2.713	3.516	5.698	9.058	37.020

### 3.2 Rezultati analize osjetljivosti

Analiza osjetljivosti je provedena kako bi se identificirali najutjecajniji čimbenici nepouzdanosti procjene NKVR. Iz dijagrama raspršenosti, prikazanih na slici 2., može se promotriti kako promjena vrijednosti četiri korištena parametra utječe na raspršenost rezultata; srednje godišnje potrošnje vode ( $D$ ), koeficijenta prirodnih gubitaka ( $c_n$ ), koeficijenta tehničkih gubitaka ( $c_t$ ) te površine sliva Vranskog jezera ( $A_c$ ).



Slika 2. Dijagrami raspršenosti nekih parametara korištenih u proračunu NKVR

Vrijednosti navedenih parametara karakterizira nepouzdanost većinski vezana uz nedostatak mjerenja; dodatnim istraživanjem može se smanjiti raspon mogućih vrijednosti, tj. povećati točnost procjene navedenih parametara. Količinu oborina, s druge strane, karakterizira nepouzdanost vezana uz stohastičku narav procesa, zbog čega se raspršenost mogućih vrijednosti ne može značajno smanjiti dodatnim istraživanjem. Promatranjem dijagrama 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 (od prikazanih) koja promjenom svoje vrijednosti značajnije utječe na promjenu raspršenosti NKVR.

Tablica 2. Indeks osjetljivosti parametara korištenih u proračunu NKVR

Parametar	Indeks osjetljivosti ukupnog učinka	Utjecaj varijacije parametra na varijancu rezultata [ % ]
Visina oborine u siječnju, $H_1$	0,2752	5,16
Visina oborine u veljači, $H_2$	0,2737	5,13
Visina oborine u ožujku, $H_3$	<b>0,4614</b>	<b>8,64</b>
Visina oborine u travnju, $H_4$	0,2733	5,12
Visina oborine u svibnju, $H_5$	0,2734	5,12
Visina oborine u lipnju, $H_6$	0,2734	5,12
Visina oborine u srpnju, $H_7$	<b>0,6542</b>	<b>12,25</b>
Visina oborine u kolovozu, $H_8$	0,2735	5,12
Visina oborine u rujnu, $H_9$	0,2749	5,15
Visina oborine u listopadu, $H_{10}$	0,2738	5,13
Visina oborine u studenom, $H_{11}$	0,2744	5,14
Visina oborine u prosincu, $H_{12}$	0,2738	5,13
Veličina sliva Vranskog jezera, $A_c$	0,3479	6,52
Prirodni gubici vode, $c_n$	<b>0,4814</b>	<b>9,02</b>
Tehnički gubici vode, $c_t$	0,3051	5,72
Jedinična potrošnja vode, $D$	0,3489	6,54
Zbroj indeksa	5,3384	100,00

Vrijednosti indeksa osjetljivosti izračunane su kako bi se kvantificirao utjecaj svakog parametra korištenog u procjeni NKVR, te su dobivene vrijednosti prikazane u tablici 1.

Parametri koji najviše utječu na promjenu raspršenosti (varijabilnost) rezultata su visina oborine u ožujku i srpnju te koeficijent prirodnih gubitaka,  $c_n$ . Najveći utjecaj na raspršenost rezultata imaju parametri stohastičke prirode, tj. mjesečne visine oborina. Kada se zbroje utjecaji spomenutih parametara (tj. svih mjesečnih oborina), može se zaključiti da njihova raspršenost uzrokuje više od 70 % raspršenosti NKVR.

## 4 Zaključak

Nosivi kapacitet vodnih resursa otoka Cresa procijenjen je predloženom metodom koja se temelji na analizi neodređenosti i osjetljivosti. Dobiveni rezultati analize neodređenosti mogu se koristiti za grubu procjenu NKVR otoka, a rezultati analize osjetljivosti daju podatke o najvećim izvorima nepouzdanosti rezultata te se mogu koristiti kao pomoć u određivanju prioriteta daljnjeg istraživanja.

Rezultat analize neodređenosti predstavlja distribuciju vjerojatnosti vrijednosti NKVR. Na temelju navedene distribucije, prikazane u ovom radu, može se lako dovesti u vezu predviđeni broj stanovnika otoka i vjerojatnost pojave nestašice vode.

Provedenom analizom osjetljivosti prikazano je da parametri koje karakterizira stohastička narav (oborine) najviše utječu na raspršenost NKVR. Neodređenost preostalih parametara (potrošnje vode, površine sliva Vranskog jezera, iznosa tehničkih i prirodnih gubitaka) većim dijelom je uzrokovana nedostatkom mjerenja nego njihovom nepredvidivošću. Nažalost, opsežnija i temeljitija istraživanja koja bi omogućila preciznije vrijednosti tih parametara ne bi bitno povećala pouzdanost procjene.

## 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.
- [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.
- [4] Statistički ljetopis Republike Hrvatske, Državni zavod za statistiku, pp. 47, 2016.
- [5] Nacrt studije izvodljivosti vodoopskrbe i odvodnje aglomeracije Cres, Martinšćica, Mali Lošinj i Veli Lošinj, 2015., Hidroing.
- [6] Bonacci, O.: Analiza varijacija razine vode jezera Vrana na otoku Cresu, *Hrvatske vode* 22 (2014) 90, pp. 337-346.
- [7] 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.