

ANALIZA I IZBOR OPTIMALNE METODE OMEKŠAVANJA VODE PRIMENOM VIKOR I AHP METODE – STUDIJA SLUČAJA

Ognjen GOVEDARICA, Tina DAŠIĆ, Miloš STANIĆ, Vladana RAJAKOVIĆ-OGNJANOVIĆ, Aleksandar ĐUKIĆ
Građevinski fakultet u Beogradu

REZIME

Prečišćavanje sirove vode do nivoa neophodnog da bi se ona koristila za vodosnabdevanje naselja predstavlja veliki izazov, naročito imajući u vidu da sirova voda nikada nije opterećena samo jednim parametrom zagađenja. Napretkom tehnologija za prečišćavanje vode, posebno membranskih tehnologija, efikasnost tretmana postala je daleko veća. Postavlja se pitanje koja tehnologija je optimalna, u pogledu odstranjivanja štetnih materija, ekonomskih, ekoloških dobiti, itd. U izboru optimalne tehnologije tretmana vode značajnu pomoć mogu da pruže metode višekriterijumske optimizacije. U slučaju koji je razmatran u okviru ovog rada primenjene su metode VIKOR i AHP na izbor optimalne konfiguracije postrojenja za omekšavanje vode bazirane na nanofiltraciji. Metoda VIKOR pokazala je bolji uvid u fizičke karakteristike parametara i značajniju objektivnost donosioca odluke u odnosu na metodu AHP.

Ključne reči: višekriterijumska optimizacija, VIKOR, AHP, omekšavanje vode, nanofiltracija

1. UVOD

Kvalitet sirove vode, bilo da je ona površinska ili podzemna voda, gotovo po pravilu ne zadovoljava standard za kvalitet pijaće vode. Kod podzemnih voda iz pojedinih izvorišta često se registruje uvećana ukupna tvrdoća vode i povišene koncentracije jona natrijuma, nitrata i jona teških metala (gvožđe i magnezijum) [1, 2]. Povišene koncentracije kalcijumovih (Ca^{2+}) i magnezijumovih (Mg^{2+}) jona, ili ukupne tvrdoće vode, uzrokuju različite nepovoljne efekte kao što su korozija, stvaranje taloga i naslaga na zidovima cevi i opremi koja je u kontaktu sa vodom, oštećenje opreme u sistemima za vodosnabdevanje, promena ukusa vode, i drugo. [3, 4, 5]. Zbog svega prethodno navedenog, kao i želje da

se postignu pozitivni efekti u pogledu pouzdanosti i efektivnosti rada vodovodnog preduzeća, poboljšanja javnog zdravlja, poboljšanja životnog komfora potrošača, ekoloških i ekonomskih benefita, proces omekšavanja vode, odnosno proces smanjenja tvrdoće vode, široko je zastupljen [6].

Reverzna osmoza i nanofiltracija su membranske tehnologije za razdvajanje i odstranjivanje različitih jona koje se koriste za omekšavanje vode. U zavisnosti od specifičnog zadatka, najbolja metoda za uklanjanje dvovalentnih jona kao što su magnezijum i kalcijum je nanofiltracija [7, 8, 9, 10].

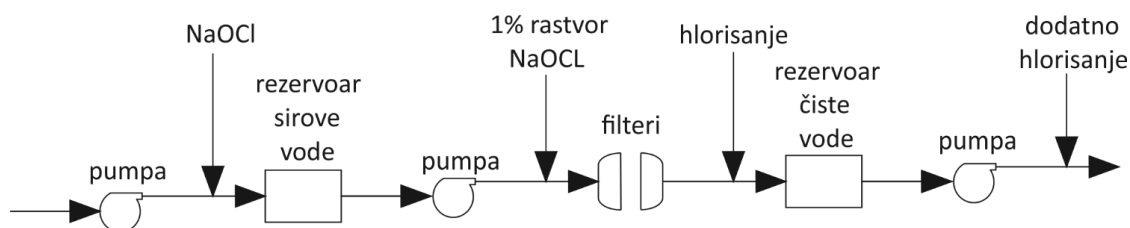
Metoda Višekriterijumskog kompromisnog rangiranja (VIKOR) se koristi za rešavanje problema koji se tiču višekriterijumskih donošenja odluka [11]. VIKOR određuje kompromisno rešenje, pritom obezbeđujući maksimalnu globalnu korist i minimalnu štetu [12]. Konačnu odluku donosi donosilac odluke koji ima složenu strukturu i nedovoljno izraženu preferenciju u postupku optimizacije [13]. Moguća je široka primena metode VIKOR za različite višekriterijumske probleme [14].

Metoda Analitičkih hijerarhijskih procesa (AHP) od samog otkrića predstavlja alatku koja služi donosiocima odluka i istraživačima. Jedna je od najčešće upotrebljivanih višekriterijumskih metoda donošenja odluka [15]. Donosioci se često suočavaju sa kompleksnim problemima, kojima jako retko može da se pristupi bez upotrebe analitičkih modela. AHP metodu odlikuje fleksibilnost i široka primenjivost [16]. Ova metoda može da se primeni i u procesima donošenja odluka koji zahtevaju da se u obzir uzmu rezultati nekoliko različitih korisnika. Pri tom AHP naglašava koji od tih individualnih korisnika ima najznačajniji uticaj na rezultat [17].

2. OPIS POSTOJEĆEG SISTEMA PREČIŠĆAVANJA VODE

Opština Odžaci se vodom snabdeva iz izvorišta podzemne vode koji se nalaze na periferiji grada. Tretman sirove vode se vrši na postrojenju za pripremu vode za piće (PPV) bruto kapaciteta 70 L/s (dve paralelne linije tretmana kapaciteta po 35 L/s). Tehnološka šema postojećeg postrojenja prikazana je na Slici 1.

U Tabeli 1. prikazani su rezultati analize kvaliteta podzemne vode na ulazu i na izlazu iz postojećeg postrojenja za prečišćavanje vode u Odžacima na osnovu analiza sprovedenih u laboratoriji za kvalitet voda Građevinskog fakulteta u Beogradu tokom proleća 2019. godine. U tabeli su prikazane i maksimalno dopuštene vrednosti za ispitivane parametre prema Pravilniku o higijenskoj ispravnosti vode za piće [18, 19].



Slika 1. Tehnološka šema postojećeg postrojenja za prečišćavanje vode za piće u Odžacima

Tabela 1. Rezultati analize kvaliteta sirove vode

Ispitivani parametri	Jedinica	Dozvoljene vrednosti	Ulazna voda	Izlazna voda
pH	-	6,8-8,5	7,25	7,66
El. provodljivost	μS/cm	<2500	1297	1387
UV	l/cm	/	0,048	0,062
p-alkalitet	mg CaCO ₃ /L	/	0	0
m- alkalitet	mg CaCO ₃ /L	/	555,5	580,0
HCO ₃ ⁻	mg/L	/	677,7	680,8
Ukupna tvrdoća	mg CaCO ₃ /L	/	524,5	542,5
TOC	mgC/L	/	2,82	3,22
Utrošak KMnO ₄		<8	3,77	1,26
Cl ⁻		250,0	69,58	96,34
SO ₄ ²⁻		250,0	53,54	65,54
Ca ²⁺		200,0	131,14	133,15
Mg ²⁺	mg/L	50,0	47,85	51,01
Na ⁺		200,0	/	111,0
K ⁺		12,0	3,99	4,16
Fe ^{2,3+}		0,3	0,07	<0,005
Mn ^{2,4+}		0,05	0,11	0,09
Ba ²⁺		700,0	256,9	256,9
Be ²⁺		/	<5	<5
B ³⁺		1000,0	<20	<20
Cu ²⁺		2000,0	<2	4,6
Zn ²⁺		3000,0	11,6	19,6
Si ⁴⁺	μg/L	/	29,6	29,3
Se ⁴⁺		10,0	<20	<20
Sr ²⁺		/	690,1	720,1
Hg ²⁺		1,0	<1	<1
As ^{3,5+}		10,0	<20	<20
Al ³⁺		200,0	<40	<40

Kvalitet prečišćene vode na PPV u Odžacima nije bio u skladu sa propisanom zakonskom regulativom [18, 19]. Parametri čija je vrednost odstupala od propisanih maksimalnih dozvoljenih koncentracija (MDK) u vodi za piće su koncentracije $Mn^{2,4+}$ i Mg^{2+} . Pored ovoga, može se primetiti da je koncentracija Na^+ jona veoma visoka u prečišćenoj vodi. Međutim, parametar koji stvara najviše problema u radu nadležnom JKP „Usluga“ i korisnicima vodovoda je visoka tvrdoća vode. Tvrdoća prečišćene vode se kreće od nešto više od 30 do preko 40 °dH (1 °dH = 17,9 mg/L). Tvrdoća vode nije limitirana Pravilnikom, ali povišena tvrdoća izaziva značajne probleme u eksploataciji vodovoda, dovodi do učestalih kvarova na cevovodima i hidromašinskoj opremi, izdvaja se u uličnim i kućnim instalacijama i može smetati korisnicima.

3. PREDLOG REŠENJA ZA POBOLJŠANJE KVALITETA VODE

Zadatak je izabrati tehnologiju za poboljšanje kvaliteta vode za piće u Odžacima tako da se tvrdoća vode smanji na prihvatljivo nisku vrednost, a da svi ostali parametri kvaliteta budu u okviru granica propisanih važećim pravilnikom. Ciljana vrednost tvrdoće nakon tretmana je oko 10 °dH (10 nemačkih stepeni).

Membranske tehnologije koriste se već više od pola veka za prečišćavanje vode, desalinizaciju morske vode, prečišćavanje različitih industrijskih otpadnih voda, u savremenoj medicini za odvajanje uree i drugih toksina u veštačkom bubregu i dr. Membranske tehnologije je moguće kombinovati i sa drugim tradicionalnim tehnologijama. U zavisnosti od karakteristika membrane i efikasnosti uklanjanja pojedinih materija, možemo razlikovati postupke Mikrofiltracije (MF), ultrafiltracije (UF), Nanofiltracije (NF) i Reverzne osmoze (RO). U razmatranom slučaju omekšavanja vode moguća je upotreba i NF i RO sistema, jer UF i MF nemaju sposobnost uklanjanja jona koji čine tvrdću vode. Ako se uzme u obzir specifičnost zadatka koji se sastoji prvenstveno u uklanjanju dvovalentnih jona magnezijuma i kalcijuma iz vode [20,21], prednost može biti data nanofiltraciji (NF) jer ona zahteva manji radni pritisak [7, 22], i ima manje investicione i eksploatacione troškove u odnosu na RO [23].

Iz navedenih razloga nadalje je razmatrana primena sistema za nanofiltraciju sa procentom prolaska vode

najmanje 85%, odnosno najviše 15% ulaznog protoka se odbacuje kao koncentrat. Ovo je moguće postići primenom dvostepenih sistema membranske filtracije gde koncentrat iz prvog stepena nanofiltracije se propušta kroz nanomembrane drugog stepena. Stepenn prečišćavanja ulazne vode ne sme biti manji od 90% za sve razmatrane parametre.

Razmatrana su sledeća alternativna rešenja:

- **Rešenje 1**

Predviđa se prolazak celokupnog protoka vode koja se prečišćava kroz nanofiltarske membrane.

- **Rešenje 2**

Predviđen je prolazak polovine protoka (50%) prečišćene vode sa postojećeg postrojenja kroz nanofiltarske membrane, a 50% protoka se ne prečišćava dodatno i meša se sa prečišćenom vodom sa membrana.

- **Rešenje 3**

Predviđen je prolazak dve trećine protoka (67%) prečišćene vode sa postojećeg postrojenja kroz nanofiltarske membrane, a 33% protoka se ne prečišćava dodatno i meša se sa prečišćenom vodom sa membrana.

- **Rešenje 4**

Predviđen je prolazak jedne trećine protoka (33%) prečišćene vode sa postojećeg postrojenja kroz nanofiltarske membrane, a 67% protoka se ne prečišćava dodatno i meša se sa prečišćenom vodom sa membrana.

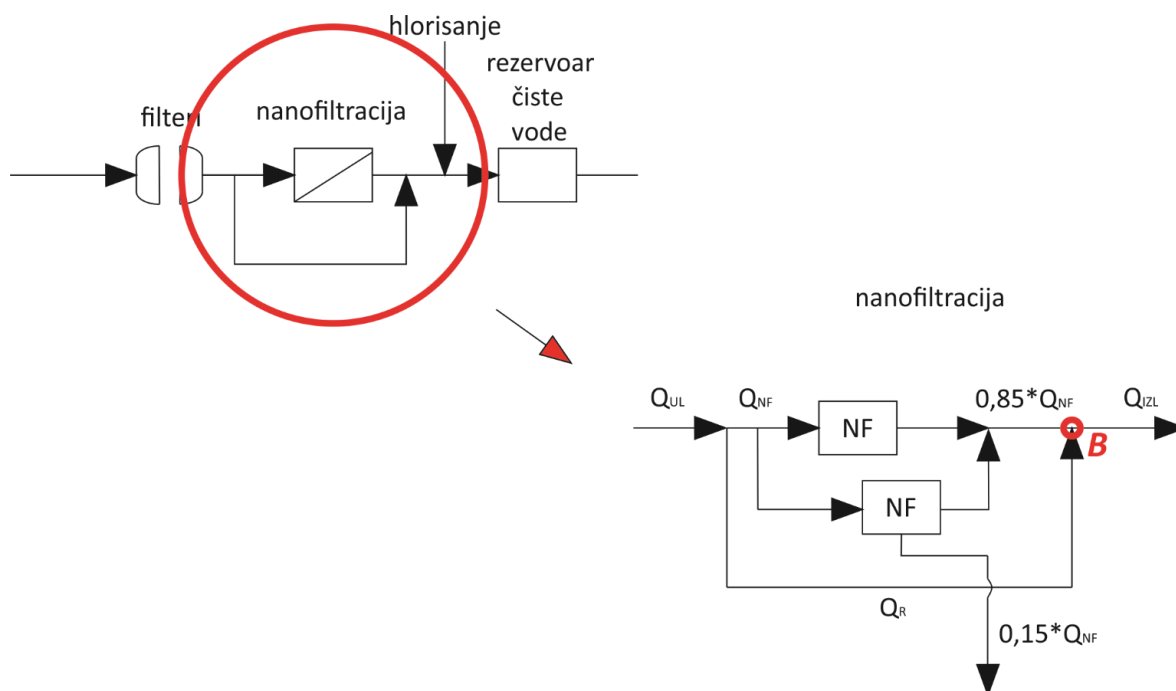
3.1. Proračun merodavnih protoka i koncentracija

Primenom principa održanja mase, za slučaj prikazan na Slici 2. biće određeni merodavni protoci i merodavne koncentracije za prethodno navedena razmatrana rešenja.

Jednačina održanja za zapreminske protoke piše se u tački B na izlazu iz NF postrojenja (Slika 2):

$$0,85 \cdot Q_{NF} + Q_R = Q_{izl} \quad (1)$$

gde je $0,85 \cdot Q_{NF}$ protok koji je prošao kroz membranu, Q_R protok kroz bajpas i Q_{izl} izlazni proticaj iz PPV.



Slika 2. Šema proračuna merodavnih protoka i koncentracija na postrojenju sa NF

Izlazni proticaj Q_{izl} jednak je maksimalnom dnevnom proticaju od 35 L/s. Ulazni proticaj sirove vode Q_{ul} je veći od izlaznog proticaja zbog gubitka vode u vidu koncentrata pri nanofiltraciji i jednak je:

$$Q_{ul} = Q_{NF} + Q_R \quad (2)$$

Vrednosti Q_{NF} i Q_R se razlikuju u razmatranim rešenjima.

Merodavne koncentracije razmatranih parametara dobiće se iz jednačine održanja mase za tačku B (slično kao i zapreminski protoci):

$$(0,1 \cdot c_{ul}) \cdot (0,85 \cdot Q_{NF}) + c_{ul} \cdot Q_R = c_{izl} \cdot Q_{izl} \quad (3)$$

Rezultati proračuna prikazani su u Tabeli 2.

Tabela 2. Proticaja i izlazne koncentracije razmatranih parametara za razmatrana rešenja

parametar	jedinica	Rešenje 1	Rešenje 2	Rešenje 3	Rešenje 4
ulazni proticaj (Q_{ul})	L/s	41,2	37,8	38,9	36,8
proticaj kroz NF (Q_{NF})	L/s	41,2	18,9	25,9	12,3
recirkulacija (Q_R)	L/s	0,0	18,9	13,0	24,6
izlazni proticaj (Q_{izl})	L/s	35,0	35,0	35,0	35,0
Uk. Tvrdoca (C_{izl})	mg/L	54,25	318,17	235,08	396,88
Mg^{2+} (C_{izl})	mg/L	5,10	29,92	22,10	37,32
$Mn^{2,4+}$ (C_{izl})	mg/L	0,01	0,05	0,04	0,07
Na^+ (C_{izl})	mg/L	11,10	65,10	48,10	81,21

4. METODOLOGIJA

4.1. VIKOR

Metoda VIKOR (VIšekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje) razvijena je za određivanje višekriterijumski optimalnog rešenja [13].

Metoda zahteva da su poznate vrednosti kriterijumskih funkcija za sve alternative, pa se formira matrica:

$$|f_{ij}|_{n \times k} \quad (4)$$

gde je i redni broj kriterijuma $i = 1, \dots, n$, a j redni broj varijante (alternative) $j = 1, \dots, J$ [13].

Metoda je razvijena na osnovu elemenata iz kompromisnog programiranja polazeći od graničnih formi L_p -metrike:

$$L_p(F^*, F) = \left[\sum_{i=1}^n (f_i^* - f_i(x))^p \right]^{1/p}; \quad 1 \leq p \leq \infty \quad (5)$$

gde parametar p ima ulogu bilansirajućeg faktora između ukupne koristi i maksimalnog individualnog odstupanja [13].

Osnovni algoritamski koraci metode VIKOR:

1. Određivanje idealne tačke na osnovu vrednosti kriterijumske funkcije

$$f^* = \text{ext}_{ij} f_{ij}; i = 1, \dots, n \quad (6)$$

gde ext označava maksimum ako i -ta kriterijumska funkcija predstavlja korist ili dobit, ili minimum za štete ili troškove. Idealna tačka može biti zadata od donosioca odluke tako što se „idealne“ vrednosti kriterijumskih funkcija zadaju kao „nivoi zadovoljenja“ [13].

2. Transformacija raznorodnih kriterijumskih funkcija u bezdimenzionalne funkcije sa opsegom u intervalu $[0,1]$. U mnogim slučajevima vrednosti kriterijumskih funkcija nisu izražene u istim jedinicama mere, odnosno postoje raznorodne kriterijumske funkcije. Da bi se u tim slučajevima koristila metrika kompromisnog rangiranja uvodi se određena transformacija, koja se postiže deljenjem sa dužinom opsega (dužinom intervala vrednosti) kriterijumske funkcije [13]:

$$d_{ij} = \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-}; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, J \quad (7)$$

3. Zadavanje težine ω_i – one predstavljaju preferencije donosioca odluke ($\omega_i > 0$). U metodi VIKOR koriste se normalizovane vrednosti težina, pri čemu je suma ω_i jednaka 1.
4. Zadavanje težine ν – zavisi od postupka donošenja konačne odluke. U metodi VIKOR koristi se $\nu = 0,5$.
5. Određuju se: mera zadovoljenja većine kriterijuma S_j (za vrednost bilansirajućeg faktora $p=1$) i mera minimalnog pojedinačnog odstupanja R_j (za vrednost bilansirajućeg faktora $p=\infty$) u bezdimenzionalnom obliku, gde je brojač $j=1, \dots, J$. Mera za kompromisno rangiranje Q_j određuje se sledećom relacijom [13]:

$$Q_j = \nu Q S_j + (1 - \nu) Q R_j; j = 1, \dots, J \quad (8)$$

gde su $Q R_j$ i $Q S_j$:

$$Q R_j = \frac{R_j - R_j^*}{R^- - R^*} \quad (9)$$

$$Q S_j = \frac{S_j - S_j^*}{S^- - S^*} \quad (10)$$

6. Rangiranje – se vrši sortiranjem alternativa prema vrednostima mera $Q S$, $Q R$ i Q [13]. Najbolja alternativa je ona za koju je vrednost mere minimalna i ona zauzima prvo mesto na rang listi [13].
 7. Kompromisno rešenje – metoda VIKOR predlaže kao najbolju višekriterijumsku varijantu onu koja je na prvoj poziciji na kompromisnoj rang listi za $\nu=0,5$ samo ako ima sledeće karakteristike:
 - „dovoljnu prednost“ nad alternativom sa sledeće pozicije (uslov U1)
 - „dovoljno stabilnu“ prvu poziciju sa promenom težine ν (uslov U2) [13].
- Uslov U1
Za vrednovanje „prednosti“ koristi se razlika između mera Q_i za $\nu=0,5$. Alternativa A' ima dovoljnu prednost nad sledećom A'' sa rang liste ako je razlika $Q(A')$ i $Q(A'')$ veća ili jednaka od „praga prednosti“ DQ , koji se određuje na osnovu teorijske vrednosti Q i broja alternativa J . DQ se određuje prema sledećoj relaciji:

$$DQ = \min(0,25; \frac{1}{J-1}) \tag{11}$$

Ako prva varijanta sa kompromisne rang liste ne ispunjava uslov prednosti smatra se da ona nije „dovoljno bolja“ od varijante sledeće pozicije [13].

• Uslov U2

Dovoljno „stabilnu“ prvu poziciju ima prva alternativa na kompromisnoj rang listi ako je ispunjen jedan od sledećih uslova:

- ima prvu poziciju na Q rang listi i u slučajevima kada je $v=0,25$ i $v=0,75$,
- ima prvu poziciju na rang listi prema QS
- ima prvu poziciju na rang listi prema QR

Ako prva alternative sa Q liste ne ispunjava uslove U1 i U2, ona nema „dovoljnu prednost“ u odnosu na alternativu sa druge pozicije, pa se formira skup kompromisnih rešenja u koji ulaze prva i alternativa iza nje.

Ako prva alternative sa Q liste ne ispunjava samo uslov U2 u skup kompromisnih rešenja ulazi samo naredna alternativa sa Q liste [13].

Ako prva alternativa sa Q liste ne ispunjava uslove U1 skup kompromisnih rešenja sadrži alternative sa Q liste $A', A'', \dots, A^{(k)}$ za koje je razlika $Q(A')$ i $Q(A^{(k)})$ manja od DQ [13].

8. Određivanje intervala stabilnosti – analizom težina i preferentne stabilnosti kompromisnog rešenja olakšava se višekriterijumsko odlučivanje, jer se izbegava zahtev da donosilac odluke precizno zada težine kriterijuma [13].

4.1. AHP

Metoda analitičkih hijerarhijskih procesa (AHP) je efikasno sredstvo za donošenje složenih odluka i može

pomoći donosiocu odluka da postavi prioritete i donese najbolju odluku pri rešavanju kompleksnih problema odlučivanja u kojima učestvuje veći broj donosioca odluke, veći broj kriterijuma i u višestrukim vremenskim periodima [24,25].

Algoritma AHP metode:

1. Izračunavanje vektora težine kriterijuma.

Da bi se odredile „težine“ za različite kriterijume, AHP započinje kreiranjem matrice uporednog poređenja kriterijuma A . Matrica A je matrica $m \times m$, gde je m broj razmatranih kriterijuma. Svaki unos a_{jk} matrice A predstavlja „važnost“ j -og kriterijuma u odnosu na k -ti kriterijum i naziva se intezitet važnosti (značajnosti) kriterijuma. Ako je $a_{jk} > 1$, tada je j -ti kriterijum važniji od k -tog kriterijuma, a ako je $a_{jk} < 1$, onda je j -ti kriterijum manje važan od k -tog kriterijuma. Ako dva kriterijuma imaju isti značaj, tada je $a_{jk} = 1$. Inteziteti značajnosti kriterijuma a_{jk} i a_{kj} ispunjavaju sledeće ograničenje:

$$a_{jk} \cdot a_{kj} = 1 \tag{12}$$

Očigledno je $a_{jj} = 1$ za sve j . Relativna važnost između dva kriterijuma meri se prema numeričkoj skali od 1 do 9, kao što je prikazano u Tabeli 3, gde se pretpostavlja da je j -ti kriterijum jednak ili važniji od k -tog kriterijuma. Objašnjenja u koloni „Tumačenje“ u Tabeli 3 su samo sugestivna i mogu se koristiti za prevođenje kvalitativnih ocena relativne važnosti između dva kriterijuma, koje donosi donosilac odluke, u brojeve. Takođe je moguće dodeliti i srednje vrednosti koje ne odgovaraju preciznoj interpretaciji. S druge strane, ocene mogu generalno pokazati neznatne nedoslednosti. Međutim, one ne stvaraju ozbiljne poteškoće za AHP [24,25].

Tabela 3 Mera relativne važnosti dva kriterijuma

Intezitet važnosti a_{jk}	Tumačenje	Objašnjenje
1	podjednaka važnost	Dva faktora jednako doprinose cilju
3	nešto važnije	Iskustvo i prosuđivanje pomalo pomažu jednom faktoru u odnosu na drugi faktor
5	mного važnije	Iskustvo i prosuđivanje snažno favorizuju jedan faktor u odnosu na drugi faktor
7	značajno mnogo važnije	Iskustvo i prosuđivanje vrlo snažno favorizuje jedan faktor u odnosu na drugi faktor. Njegova važnost se pokazije u praksi
9	apsolutno važnije	Dokazi koji favorizuju jedan faktor u odnosu na drugi su najveće moguće validnosti
2, 4, 6, 8	srednje vrednosti	Kada je potreban kompromis

Jednom kada se matrica A postavi, iz A je moguće izvesti matricu normalizovanog uporednog poređenja A_{norm} za koju važi da je zbir inteziteta važnosti u svakoj koloni jednak 1, tj. svaki normalizovanih inteziteta važnosti \bar{a}_{jk} matrice A_{norm} se računa kao [24,25]:

$$\bar{a}_{jk} = \frac{a_{jk}}{\sum_{i=1}^m a_{ik}} \quad (13)$$

Konačno, vektor težine kriterijuma w (koji je m -dimenzionalni vektor kolone) se gradi prosekom normalizovanih inteziteta važnosti u svakom redu A_{norm} , odnosno računa se [24,25]:

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{a}_{ij}}{m} \quad (14)$$

2. Izračunavanje matrice rešenja za razmatrane alternative.

Matrica rezultata alternativa S je matrica $n \times m$. Svaki unos s_{ij} matrice S predstavlja rezultat i -tih alternativa u odnosu na j -ti kriterijum. Da bi se dobili takvi rezultati, uporedna matrica poređenja $B^{(j)}$ prvo se formira za svaki od m kriterijuma, $j = 1, \dots, m$. Matrica $B^{(j)}$ je matrica $n \times n$, gde je n broj procenjenih alternativa. Svaki unos $b_{ih}^{(j)}$ matrice $B^{(j)}$ predstavlja „važnost“ i -te alternative u poređenju sa h -tom alternativom u odnosu na j -ti kriterijum, i naziva se intezitet važnosti (značajnosti) alternative. Ako je $b_{ih}^{(j)} > 1$, onda je i -ta alternativa bolja od h -te alternative, a ako je $b_{ih}^{(j)} < 1$ tada je i -ta alternativa gora od h -te alternative. Ako se dve alternative ocenjuju kao ekvivalentne u odnosu na j -ti kriterijum, tada je intezitet važnosti alternative jednak 1 [24,25].

Inteziteti značajnosti alternativa $b_{ih}^{(j)}$ i $b_{hi}^{(j)}$ ispunjavaju sledeće ograničenje:

$$b_{ih} \cdot b_{hi} = 1 \quad (15)$$

Očigledno je $b_{ii}^{(j)} = 1$ za sve i . Lestvica evaluacije slična je onoj koja je prikazana u Tabeli 3 mogu se koristiti za prevođenje kvalitativnih ocena relativne važnosti između dva kriterijuma, koje donosi donosilac odluke, u brojeve [24,25].

Drugo, AHP primenjuje na svaku matricu $B^{(j)}$ isti postupak, u dva koraka, opisan za matricu uporednog poređenja kriterijuma A , tj. deli svaki

intezitet značajnosti atributa zbirom inteziteta značajnosti atributa u istoj koloni, a zatim se unosi prosek unosa za svaki red, čime se dobijaju vektori ocene $s^{(j)}$, $j = 1, \dots, m$. Vektor $s^{(j)}$ sadrži rezultate ocenjenih alternativa u odnosu na j -ti kriterijum. Na kraju, matrica rezultata alternativa S se dobija matrica kao:

$$S = \begin{bmatrix} s^{(1)} & \dots & s^{(m)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

tj. j -ta kolona matrice S odgovara vektoru $s^{(j)}$ [24,25].

3. Rangiranje opcija.

Jednom kada se izračuna vektor težine w i matrica rezultata S , AHP dobija vektor v globalnih rezultata množenjem S i w :

$$v = S \cdot w \quad (17)$$

i -ti unos v_i od v predstavlja globalni rezultat koji je AHP dodelio alternativni i -toj. Završni korak, rangiranje alternativa je ređanje globalnih rezultata u opadajućem poredak [24,25].

4. Provera konzistentnosti

Kada se vrši mnogo uporednih poređenja, obično se mogu pojaviti neke nedoslednosti. Na primer, pretpostavimo da su razmotrena 3 kriterijuma, a donosilac odluke procenjuje da je prvi kriterijum nešto važniji od drugog, dok je drugi kriterijum nešto važniji od trećeg kriterijuma. Očigledna nedoslednost nastaje ako donosilac odluka greškom procenjuje da je treći kriterijum podjednako važan ili važniji od prvog kriterijuma. S druge strane, dolazi do male nedoslednosti ako donosilac odluke proceni da je prvi kriterijum takođe nešto važniji od trećeg. Dosledna procena bi bila na primer, da je prvi kriterijum mnogo važniji od trećeg [24,25].

AHP uključuje efikasnu tehniku za proveru konzistentnosti izvršenih procena od strane donosioca odluka prilikom foriranja svih matrica uporednog poređenja uključenih u proces, tj. matrice A i matrice $B^{(j)}$. Tehnika se oslanja na računanje odgovarajućeg indeksa konzistencije, a biće opisana samo za matricu A . Jednostavno ju je prilagoditi matrici $B^{(j)}$ zamenom A sa $B^{(j)}$, w sa $s^{(j)}$, a m sa n [24,25].

Indeks konzistentnosti (CI) se dobija tako što se najpre izračuna računski skalar x kao prosek elemenata vektora čiji j -ti element predstavlja odnos j -tog elementa vektora $A \cdot w$ i odgovarajućeg elementa vektora w , odnosno:

$$CI = \frac{(x - m)}{m - 1} \tag{18}$$

Savršeno konzistentni donosioci odluka uvek bi trebalo da dobiju $CI = 0$, ali male nedoslednosti mogu se tolerisati.

$$\text{Za } \frac{CI}{RI} < 1 \tag{19}$$

nedoslednosti su podnošljive, a od AHP se može očekivati pouzdan rezultat. RI je indeks slučajnosti, tj. indeks doslednosti kada su inteziteti značajnosti matrice A potpuno slučajni. Vrednosti RI za „male“ probleme ($m \leq 10$) prikazane su u Tabeli 4. [24,25].

Tabela 4 Vrednosti indeksa slučajnosti RI za „male“ probleme

m	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,51

5. REZULTATI I DISKUSIJA

U okviru ovog poglavlja prikazani su rezultati dobijeni primenom metoda VIKOR i AHP.

Razmatrano je ukupno pet alternativa:

- Alternativa 1 - predstavlja postojeći tretman vode za piće na PPV Odžaci (Rešenje 0). Ova alternativa ispituje da li je potrebno poboljšanje postojećeg tretmana, tj. ova alternativa kaže „ne raditi ništa“ ,
- Alternativa 2 – predstavlja Rešenje 1 u okviru koga se predviđa prolazak celokupnog protoka vode koja se prečišćava kroz nanofilterske membrane,
- Alternativa 3 – predstavlja Rešenje 2 u okviru koga je predviđen prolazak polovine protoka (50%) prečišćene vode sa postojećeg postrojenja kroz nanofilterske membrane, a 50% protoka se ne prečišćava dodatno i meša se sa prečišćenom vodom sa membrana,
- Alternativa 4 – predstavlja Rešenje 3 u okviru koga je predviđen prolazak dve trećine protoka (67%) prečišćene vode sa postojećeg postrojenja kroz

nanofilterske membrane, a 33% protoka se ne prečišćava dodatno i meša se sa prečišćenom vodom sa membrana,

- Alternativa 5 – predstavlja Rešenje 4 u okviru koga je predviđen prolazak jedne trećine protoka (33%) prečišćene vode sa postojećeg postrojenja kroz nanofilterske membrane, a 67% protoka se ne prečišćava dodatno i meša se sa prečišćenom vodom sa membrana.

Alternative su razmatrane prema sledećim kriterijumima:

- investicije,
- operativni troškovi,
- ukupna tvrdoća,
- koncentracija Mg^{2+} jona,
- koncentracija $Mn^{2,4+}$ jona,
- koncentracija Na^+ jona.

U Tabeli 5 prikazane su vrednosti pojedinih varijanti (alternativa) prema definisanim kriterijumima.

Tabela 5. Vrednosti pojedinih varijanti (alternativa) prema definisanim kriterijumima

Kriterijum		Alternative						
naziv	jedinica	ekstremum	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	
f_1	investicije	€	min	0	617.700	283.800	388.900	184.300
f_2	operativni troškovi	€/god	min	124.200	389.600	246.200	291.300	203.400
f_3	Ukupna tvrdoća	mg/L	min	542,5	54,25	318,17	235,08	396,88
f_4	Mg^{2+}	mg/L	min	51,01	5,1	29,92	22,1	37,32
f_5	$Mn^{2,4+}$	mg/L	min	0,09	0,01	0,05	0,04	0,07
f_6	Na^+	mg/L	min	111	11,1	65,1	48,1	81,21

Rangiranje je izvršeno u sledeća četiri slučaja:

- Rangiranje prema OPERATERU ($R1$) – najveća težina daje se minimizaciji operativnih troškova, kao i ukupnoj tvrdoći vode.
- Rangiranje prema FINANSIJERU ($R2$) – najveća težina daje se investicionim troškovima.
- Rangiranje prema KORISNIKU ($R3$) – na prvom mestu se teži boljem kvalitetu pijaće vode.
- Nulto rangiranje ($R4$) – sve kriterijumske funkcije nose istu težinu.

U svim rangiranjima parametar kvaliteta koji se odnosi na ukupnu tvrdoću vode ima nešto veću težinu u odnosu na ostale parametre kvaliteta jer taj parametar predstavlja najveći problem u vodovodnom sistemu.

Za procenu investicija, korišćen je podatak da ulaganja iznose približno 15.000 € po L/s instalisanog kapaciteta NF postrojenja. Operativni troškovi se iskazuju po kubnom metru prečišćene vode i sastoje se iz dva dela:

- operativni troškovi postojećeg PPV, bez NF postrojenja koji približno iznose 0,25 €/m³,
- operativni troškovi nanofilterskog postrojenja koji iznose približno 0,15 €/m³ [26, 27].

4.1. VIKOR – rezultati

Težine razmatranih kriterijuma određene su prema preferenciji donosioca odluke. Usvojene vrednosti težina prikazane su u Tabeli 6.

Tabela 6. Usvojene težine kriterijuma prema razmatranim rangiranjima rangiranju

Kriterijum ime	Rangiranje			
	$R1$	$R2$	$R3$	$R4$
investicije	0,10	0,40	0,10	0,17
operativni troškovi	0,40	0,10	0,10	0,17
Ukupna tvrdoća	0,20	0,20	0,35	0,17
Mg ²⁺	0,10	0,10	0,15	0,17
Mn ^{2,4+}	0,10	0,10	0,15	0,17
Na ⁺	0,10	0,10	0,15	0,17

U Tabeli 7 prikazane su vrednosti mere rangiranja Q_i za težinu strategije $v = 0,50$ za sve alternative po

razmatranim rangiranjima. Vrednosti Q_i za kompromisna rešenja su boldovane.

Tabela 7. Mera rangiranja Q_i za težinu strategije $v = 0,50$ za sve alternative po razmatranim rangiranjima

	$R1$	$R2$	$R3$	$R4$
A_1	0,338	0,340	1	1
A_2	0,723	0,726	0	0,480
A_3	0,084	0,084	0,444	0,260
A_4	0,463	0,465	0,245	0,277
A_5	0,5	0,5	0,648	0,577

Rangiranjem prema OPERATORU ($R1$) alternativa A_3 zadovoljava uslove U1 i U2. Zbog toga je alternativa A_3 kojom je predviđen prolazak polovine protoka (50%) prečišćene vode sa postojećeg postrojenja kroz nanofilterske membrane, a 50% protoka se ne prečišćava dodatno i meša se sa prečišćenom vodom sa membrana kompromisno rešenje. Ova alternativa ostaje stabilno na prvoj poziciji kompromisne rang liste i u slučajevima smanjivanja težine tog parametra i povećavanjem značaja parametara kvaliteta vode.

Rangiranjem prema FINANSIJERU ($R2$) alternativa A_3 se takođe izdvaja kao najbolje kompromisno rešenje (zadovoljeni su i uslovi U1 i U2). Smanjenje značajnosti (težine) kriterijuma Investicije i povećavanjem značaja Operativnih troškova alternativa A_3 ostaje stabilno na prvoj poziciji kompromisne rang liste, sa dovoljnom prednošću nad ostalim rešenjima. U slučaju smanjenja težine Investicija na račun povećanja kriterijuma koji se odnose na parametre kvaliteta vode A_3 i dalje ostaje najbolje rešenje, s tim što se njegova prednost u odnosu na varijantu (sledeću na listi) A_4 smanjuje.

Rangiranjem prema KORISNIKU ($R3$) alternativa A_2 zadovoljava uslove U1 i U2. Zbog toga je alternativa A_2 kojom je predviđa prolazak celokupnog protoka vode koja se prečišćava kroz nanofilterske membrane. Smanjenjem značaja kriterijuma Ukupna tvrdoća na račun povećavanja značaja ostalih parametara kvaliteta alternativa A_2 ostaje na prvoj poziciji kompromisne rang liste.

Prema NEUTRALNOM ($R4$) rangiranju alternativa A_3 kao najbolje rangirana ne zadovoljava uslove U1 i U2. Zbog toga su u skupu kompromisnih rešenja i alternative A_3 , A_4 i A_2 .

Na osnovu sprovedenih analiza može se zaključiti da su alternative A_1 i A_5 znatno lošije od preostale tri alternative i mogu se izbaciti iz daljih analiza, odnosno najmanje 50% vode treba prečišćavati korišćenjem nanofilterskih membrana.

5.2. AHP – rezultati

U Tabeli 8 prikazane su težine dobijene nakon normalizacije uporednog poređenja kriterijuma, indeks

konzistentnosti (CI), indeks slučajnosti (RI) i odnos CI/RI prema razmatranim rangiranjima, a u Tabeli 9 prikazane su težine dobijene nakon normalizacije uporednog poređenja alternativa, indeks konzistentnosti (CI), indeks slučajnosti (RI) i odnos CI/RI prema razmatranim rangiranjima.

Vrednosti globalnih rezultata v_i za sve alternative po razmatranim rangiranjima prikazane su u Tabeli 10. Vrednosti v_i za kompromisna rešenja su boldovane.

Tabela 8. Težine dobijene nakon normalizacije uporednog poređenja kriterijuma, indeks konzistentnosti (CI), indeks slučajnosti (RI) i odnos CI/RI prema razmatranim rangiranjima

Kriterijum		Rangiranja			
ime	jedinica	R1	R2	R3	R4
investicije	€	0,10	0,44	0,03	0,17
operativni troškovi	€/god	0,44	0,23	0,05	0,17
Ukupna tvrdoća	mg/L	0,23	0,16	0,41	0,17
Mg ²⁺	mg/L	0,16	0,10	0,16	0,17
Mn ^{2,4+}	mg/L	0,05	0,05	0,11	0,17
Na ⁺	mg/L	0,03	0,03	0,25	0,17
CI		0,09	0,09	0,10	0,00
RI		1,24	1,24	1,24	1,24
CI/RI		0,08	0,07	0,08	0,00

Tabela 9. Težine dobijene nakon normalizacije uporednog poređenja alternativa, indeks konzistentnosti (CI), indeks slučajnosti (RI) i odnos CI/RI prema razmatranim rangiranjima

	investicije	operativni troškovi	Ukupna tvrdoća	Mg ²⁺	Mn ^{2,4+}	Na ⁺
A_1	0,50	0,50	0,13	0,13	0,13	0,13
A_2	0,03	0,03	1,46	1,46	1,46	1,46
A_3	0,13	0,13	0,71	0,71	0,71	0,71
A_4	0,07	0,07	1,08	1,08	1,08	1,08
A_5	0,26	0,26	0,45	0,45	0,45	0,45
CI	0,06	0,06	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03
RI	1,12	1,12	1,12	1,24	1,24	1,24
CI/RI	0,05	0,05	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02

Tabela 10. Globalni rezultati v_i za sve alternative po razmatranim rangiranjima

	$R1$	$R2$	$R3$	$R4$
A_1	0,3311	0,3792	0,1609	0,2584
A_2	0,7024	0,5165	1,3602	1,003
A_3	0,4039	0,3285	0,6707	0,527
A_4	0,5454	0,4141	1,01	0,7582
A_5	0,3519	0,3272	0,4393	0,3944

Alternativa koja ima najveću težinu u svim razmatranim slučajevima rangiranja je alternativa A_2 , koja predviđa se prolazak celokupnog protoka vode koja se prečišćava kroz nanofilterske membrane. Alternativa A_4 , u okviru koje je predviđen prolazak dve trećine protoka (67%) prečišćene vode sa postojećeg postrojenja kroz nanofilterske membrane, a 33% protoka se ne prečišćava dodatno i meša se sa prečišćenom vodom sa membrana, na drugom mestu u svim razmatranim slučajevima rangiranja.

5. ZAKLJUČAK

Metoda VIKOR daje jasan uvid u fizičke karakteristike parametara, odnosno vrši transformaciju raznorodnih kriterijumskih funkcija, koje sadrže podatke o fizičkim karakteristikama razmatranih parametara, u bezdimenzionalne funkcije. Sa druge strane metoda AHP vrši deskriptivno poređenje odgovarajućih parametara koje u mnogome zavisi od iskustva donosioca odluke.

I u metodi VIKOR i u metodi AHP donosilac odluke zadaje težine, pa one zapravo predstavljaju preferenciju donosioca odluke. To za posledicu može imati unošenje subjektivnih ocena, koje u mnogome mogu uticati na konačan rezultat, tj. optimalno rešenje. Ovo se može prevazići ukoliko donosilac odluke ima dovoljno iskustva da pravilno proceni težine koje zadaje.

Metoda VIKOR kao rezultat, u razmatranom primeru, daje kompromisno rešenje koje se razlikuju od jednog do drugog razmatranog rangiranja, što je posledica promene preferencije donosioca odluke. Alternative A_1 i A_5 su najlošije prema svim rangiranjima. Alternativa A_3 je kompromisno rešenje za preferencije OPERATORA i FINANSIJERA jer ima najmanje investicije i operativne troškove u odnosu na preostale tri varijante. Sa stanovišta KORISNIKA najvažniji kriterijumi su oni koji se odnose na kvalitet vode, pa je u tom slučaju

alternativa A_2 , kod koje su vrednosti parametara kvaliteta vode najniže (najbolje), rešenje rangirano kao najbolje na kompromisnoj listi. NEUTRALNO rangiranje pokušava da zadovolji sve kriterijume podjednako što za posledicu ima skup kompromisnih rešenja A_3 , A_4 i A_2 .

Metoda AHP, u razmatranom slučaju, daje kao najbolju alternativu A_2 u svim razmatranim slučajevima rangiranja. Ovo je posledica „ukrštanja“ rangiranja alternativa prema fizičkim karakteristikama razmatranih parametara, nezavisno od preferencije donosioca odluke i rangiranja parametara prema preferencijama donosioca odluke.

LITERATURA

- [1] Azimi S., Azhdary Moghaddam M., Hashemi Monfared S.A. (2019) Prediction of annual drinking water quality reduction based on Groundwater Resource Index using the artificial neural network and fuzzy clustering. *Journal of Contaminant Hydrology*, br. 220, str. 6-17.
- [2] Hailu Y., Tilahun E., Brhane A., Resky H. & Sahu O. 2019 Ion exchanges for calcium, magnesium and total hardness from ground water with natural zeolite. *Groundwater for Sustainable Development*, br. 8, str. 457-467.
- [3] Boyd C.E., Tucker C.S., Somridhvej B. (2016) Alkalinity and hardness: critical but elusive concepts in aquaculture. *Journal of the World Aquaculture Society*, br. 47(1), str. 6-41.
- [4] Sanjuan I., Benavente D., Exposito E., Montiel V. (2019) Electrochemical water softening: Influence of water composition on the precipitation behavior. *Separation and Purification Technology*, br. 211, str. 857-865.
- [5] Kozisek F (2020) Regulation for calcium, magnesium or hardness in drinking water in the European Union member states. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, br. 112, str. 1-8.
- [6] Beeftink M., Hofs B., Kramer O., Odegard I., van der Wal A. (2021) Carbon footprint of drinking water softening as determined by life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, br. 278, str. 1-10.
- [7] Van der Bruggen B. & Vandecasteele C. (2003) Removal of pollutants from surface water and

- groundwater by nanofiltration: overview of possible application in the drinking water industry. *Environmental Pollution*, br. 122, str. 435-445.
- [8] Homayoonfal M., Akbari A., Reza Mehrnia M. (2010) Preparation of polysulfone nanofiltration membranes by UV-assisted grafting polymerization for water softening. *Desalination*, br. 263, str. 217-225.
- [9] Nanda D., Tung K.L., Li Y.L., Lin N.J., Chuang C.J. (2010) Effect of pH on membrane morphology, fouling potential, and filtration performance of nanofiltration membrane for water softening. *Journal of Membrane Science*, br. 349, str. 411-420.
- [10] Rahimpourt A., Jahanshahi M., Mortazavian N., Madaeni S.S., Mansourpanah Y. (2010) Preparation and characterization of asymmetric polyethersulfone and thin-film composite polyamide nanofiltration membranes for water softening. *Applied Surface Science*, br. 256, str. 1657-1663.
- [11] Gao Z., Liang R.Y., Xuan T. (2019) VIKOR method for ranking concrete bridge repair projects with target-based criteria. *Results in Engineering*, br. 3, str. 1-9.
- [12] Opricovic S., Tzeng G.H. (2004) Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, br. 156, str. 445-455.
- [13] Opricović S., (1998) Višekriterijmska optimizacija sistema u građevinarstvu. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, str. 1-175.
- [14] Mateusz P., Danuta M., Malgorzata L., Mariusz B., Kesra N. (2018) TOPSIS and VIKOR methods in study of sustainable development in the EU countries. *Procedia Computer Science*, br. 126, str. 1683-1692.
- [15] Vaidya, O.S., Kumar, S. (2006) Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operation Research*, br. 169, str. 1-29.
- [16] Ho, W., Ma., X. (2018) The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, br. 267, str. 399-414.
- [17] Ivanco, M., Hou, G., Michaeli, J. (2017) Sensitivity analysis method to address user disparities in the analytic hierarchy process. *Expert System With Applications*, br. 90, str. 111-126.
- [18] Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće, Sl. list SRJ 42/1998 i 44/1999.
- [19] Pravilnik o higijenskoj ispravnosti vode za piće, Sl. gl. RS 28/2019.
- [20] Mohammad A.W., Teow Y.H., Amg W.L., Chung Y.T., Oatley-Radcliff D.L., Hilal N. (2015) Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects. *Desalination*, br. 356, str. 226-254.
- [21] Su B., Wu T., Zhechao L., Cong X., Gao X., Gao C. (2015) Pilot study of seawater nanofiltration softening technology based on integrated membrane system. *Desalination*, br. 368, str. 193-201.
- [22] Labban O., Liu C., Chong T.H., Lienhard V J.H. (2017) Fundamentals of low-pressure nanofiltration: Membrane characterization, modelling, and understanding the multi-ionic interactions in water softening. *Journal of Membrane Science*, br. 521, str. 18-32.
- [23] Van der Bruggen B., Goossens H., Everard P.A., Stemgee K. & Rogge W. 2009 Cost-benefit analysis of central softening for production of drinking water. *Journal of Environmental Management*, br. 91, str. 541-549.
- [24] Saaty T.L., Kearns K.P. (1985) Analytical Planning. The Organization of Systems. Pergamon Press, Oxford, 19-85.
- [25] Labib A., (2014) Learning from Failures. Decision Analysis of Major Disasters, Butterworth-Heinemann. Portsmouth, str. 33-44.
- [26] Shahmansouri A., Bellona C. (2015) Nanofiltration technology in water treatment and reuse: applications and costs. *Water Science & Technology*, br. 71(3), str. 309-319.
- [27] Tang C., Merks C.W.A.M, Albrechtsen H.J. (2019) Water softeners add comfort and consume water – comparison of selected centralised and decentralised softening technologies. *Water Supply*, br. 19(7), str. 2088-2097.

ANALYSIS AND SELECTION OF THE OPTIMAL METHOD OF WATER SOFTENING USING VIKOR AND AHP METHOD – CASE STUDY

by

Ognjen GOVEDARICA, Tina DAŠIĆ, Miloš STANIĆ, Vladana RAJAKOVIĆ-OGNJANOVIĆ, Aleksandar ĐUKIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

Treatment of raw water in order to achieve quality required for drinking water can be a major challenge, especially considering that raw water usually contains more than one pollutant. With the advancement of water treatment technologies, especially membrane technologies, the efficiency of water purification has been increasing. The question is which technology is optimal, in terms of removal of pollutants, economic, environmental benefits and other criteria. Methods of multi-criteria optimization can provide significant assistance in choosing the optimal water treatment

technology. In this paper, the VIKOR and AHP methods were applied for selection of optimal drinking water treatment scheme of water softening plant based on nanofiltration. The VIKOR method showed a better insight into the physical characteristics of the water quality parameters and a more significant objectivity of the decision maker in relation to the AHP method.

Key words: multicriteria optimization, VIKOR, AHP, water softening, nanofiltration

Redigovano 12.11.2020.