

VIŠEKRITERIJUMSKA ANALIZA VARIJANTI REKONSTRUKCIJE REGIONALNOG VODOZAHVATNOG SISTEMA METODOM PROMETHEE

Ratko BAJČETIĆ, JVP „Vode Vojvodine“, Novi Sad
Bojan SRĐEVIĆ, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad

REZIME

Za realni slučaj rekonstrukcije/izgradnje jednog od važnijih regionalnih vodozahvatnih sistema u hidrosistemu DTD u Vojvodini prikazan je celoviti postupak višekriterijumske analize i izbora najbolje varijante između više ponuđenih u tehničkoj dokumentaciji. Težište je stavljeno na manipulaciju kriterijumima i definisanje različitih scenarija analize. Korišćen je pogodan postupak dovođenja svih kriterijuma (dakle i kvalitativnih) u kvantitativnu i samerljivu metriku, a dva uvedena kriterijuma su originalna i odnose se na samostalnu upravljivost sistema i ekološke efekte.

Problem odlučivanja postavljen je za regionalni sistem Bezdán, a zatim rešen metodom PROMETHEE u kome su preferentne funkcije, pripadajući parametri i težine četiri kriterijuma tretirani putem šest scenarija analize.

Ključne reči: višekriterijumsko odlučivanje, vodozahvatni sistem, PROMETHEE

1. UVOD

Višekriterijumska analiza istražuje načine kako da se bez uprošćenja polaznog problema odredi kompromisno rešenje, pošto strogo optimalno rešenje zbog konflikta kriterijuma ne postoji. Najčešće je to proces vrednovanja skupa mogućih alternativa u odnosu na skup odabranih kriterijuma, odnosno ciljeva. U hijerarhijskom smislu, analiza i odlučivanje se sastoje u određivanju numerički iskazanih težinskih vrednosti alternativa u odnosu na podkriterijume, podkriterijuma u odnosu na kriterijume i najzad kriterijuma u odnosu na globalni cilj.

U vodoprivredi su problemi odlučivanja često slabo strukturirani, zbog čega je potrebno primeniti heurističke tehnike zasnovane na ekspertskim znanjima

donosilaca odluka. Uloga donosilaca odluka je učvršćivanje slabo strukturiranog problema i dovođenje do nivoa kada se problem rešava matematičkim modelima. Dobijena rešenja su veoma retko optimalna i najčešće predstavljaju kompromisna, odnosno najbolja rešenja.

Postojanje više alternativa i više kriterijuma, od kojih neke treba maksimizirati a neke minimizirati, iziskuje primenu metoda koji su fleksibilniji od matematičkih tehnika čiste optimizacije. U ovom radu je izvršena višekriterijumska analiza varijanti za izgradnju vodozahvatnog sistema Bezdán ponuđenih u odgovarajućoj tehničkoj dokumentaciji [6]. Korišćen je metod PROMETHEE u obe svoje varijante za parcijalno i potpuno rangiranje.

U radu je demonstrirano kako se kvalitativni i kvantitativni kriterijumi efikasno koriste u istom višekriterijumskom kontekstu putem učvršćivanja strukture problema odlučivanja. Naime, dva kriterijuma iz oblasti upravljanja i ekološkog uticaja definisana su na originalan način i iz kvalitativnog prevedena u kvantitativni domen da bi im se metrika suštinski vezala za dva druga, uobičajena ekonomska kriterijuma.

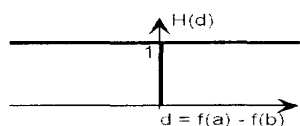
2. PROMETHEE I I 2

PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod Enrichment Evaluation) je višekriterijumski metod koji tretira uobičajenu matricu performanse alternativa u odnosu na kriterijume, (Slika 1). Ako se usvoji da su alternative označene kao a_1, a_2, \dots, a_n , a kriterijumi kao f_1, f_2, \dots, f_k , tada se metod sastoji iz vrednovanja alternativa po kriterijumima i utvrđivanja mere međusobne dominacije alternativa na osnovu kojih se iste zatim rangiraju. Metod koristi preferentne funkcije prikazane na slici 2 za međusobno poređenje alternativa. Izbor funkcije preference i definisanje

parametara koji su u njima sadržani vrši korisnik metoda, najčešće donosilac odluka ili analitičar. Karakterističan zahtev koji metod postavlja je uvažiti devijacije vrednosti kriterijuma. Treba napomenuti da metod eliminiše efekte skalarizacije, da je u suštini jednostavan i razumljiv, a svojstvo metoda je i da jasno prikazuje konfliktnost kriterijuma.

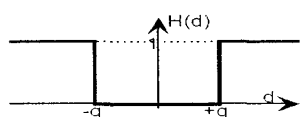
| | $f_1(\cdot)$ | $f_2(\cdot)$ | | $f_j(\cdot)$ | | $f_k(\cdot)$ |
|-------|--------------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|
| a_1 | $f_j(a_i)$ | | | | | |
| a_2 | | | | | | |
| ... | | | | | | |
| a_i | | | | | | |
| ... | | | | | | |
| a_n | | | | | | |

Slika 1. Matrica performanse

**Tip I (obična)**

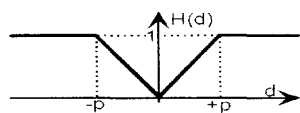
$$H(d) = \begin{cases} 0 & \text{if } d = 0 \\ 1 & \text{if } |d| > 0 \end{cases}$$

Tip I: Obična (osnovna; nema parametre; retko se koristi.);

**Tip II (U oblik)**

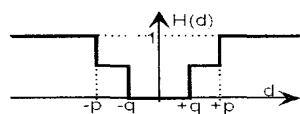
$$H(d) = \begin{cases} 0 & \text{if } |d| \leq q \\ 1 & \text{if } |d| > q \end{cases}$$

Tip II: U (sadrži samo prag indiferentnosti; češće se koristi kod ocene alternativa za kvalitativne kriterijume);

**Tip III (V oblik)**

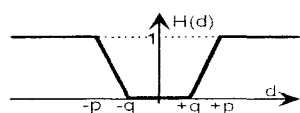
$$H(d) = \begin{cases} \frac{|d|}{p} & \text{if } |d| \leq p \\ 1 & \text{if } |d| > p \end{cases}$$

Tip III: V (sadrži samo prag značaja preference; često se koristi kod ocene alternativa za kvalitativne kriterijume; razlikuje se od prethodne jer je H(d) proporcionalna odstupanju alternativa u opsegu vrednosti od 0 do |p|;

**Tip IV (oblik nivoa)**

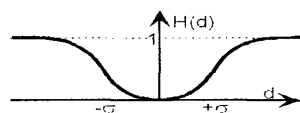
$$H(d) = \begin{cases} 0 & \text{if } |d| \leq q \\ 1/2 & \text{if } q < |d| \leq p \\ 1 & \text{if } |d| > p \end{cases}$$

Tip IV – Nivo (sadrži prag indiferentnosti q i prag značaja preference p; stepenastog je oblika i često se koristi pri oceni alternativa za kvalitativne kriterijume);

**Tip V (V-linearan oblik)**

$$H(d) = \begin{cases} 0 & \text{if } |d| \leq q \\ \frac{|d| - q}{p - q} & \text{if } q < |d| \leq p \\ 1 & \text{if } |d| > p \end{cases}$$

Tip V – Linearna (sadrži prag indiferentnosti q i prag značaja preference p; H(d) je proporcionalna odstupanju alternativa u opsegu od (-p-q) do (+q+p); često se koristi pri oceni alternativa za kvantitativne kriterijume);

**Tip VI (Gausova)**

$$H(d) = 1 - e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}$$

Tip VI – Gaus (sadrži samo Gausov prag značaja sigma; redje se koristi);

Slika 2. Funkcije preference u metodu PROMETHEE

Međusobnim poređenjem parova alternativa u odnosu na dati kriterijum definiše se intenzitet razlike između dve alternative P(a,b) (Slika 2). Pomenuta funkcija se kreće u granicama od 0 do 1. Ako je P(a,b) = 0, to znači da **nema razlike** među alternativama, a ako je P(a,b) =

1, alternativa a **potpuno dominira** nad alternativom b. U slučajevima kada je funkcija P(a,b) bliska graničnim vrednostima govori se o slaboj ili jakoj preferentnosti. Ima nekoliko tipičnih mera preferentnosti među alternativama. Osnovni parametri ovih mera su:

- $0 \leq P(a,b) \leq 1$ za svako a i b, gde su a i b bilo koje dve alternative iz skupa svih alternativa A, ($\forall a, b \in A$)
- $P(a,b) = 0$ $d = f(a) - f(b) \leq 0$ Nema preference između a i b.
- $P(a,b) \cong 0$ $d = f(a) - f(b) > 0$ Slaba preferenca a nad b
- $P(a,b) < 1$ $d = f(a) - f(b) \gg 0$ Jaka preferenca a nad b
- $P(a,b) = 1$ $d = f(a) - f(b) \gg \gg 0$ Striktna preferenca a nad b

Svako poređenje alternativa a i b mora kao rezultat dati jednu od tri relacije: aPb , aIb ili aRb , odnosno tzv. parcijalnu preferencu. Vrednovanje i rangiranje alternativa sastoji se iz određivanja d-ova i korespondentnih vrednosti H-ova za odabrane funkcije na slici 2. Tačnije, za svaki kriterijum se odabere jedna funkcija H, a zatim vrše poređenja alternativa za taj kriterijum, radi se po svim kriterijumima, određuju otežane sume H vrednosti u odnosu na svaki kriterijum i konačno određuju tzv. parcijalni i ukupni indeksi preferenci alternativa.

Metod PROMETHEE razlikuje dva tipa rangiranja, PROMETHEE 1 i PROMETHEE 2. Tip 1 daje tzv. parcijalne rangove prema tokovima („sumama“) dominacije neke alternative u odnosu na druge. Razlikuju se pozitivan i negativan tok parcijalne dominacije: (a) pozitivan tok Φ^+ izražava koliko je neka alternativa dominantna u odnosu na druge, odnosno koliko ima „prednosti“ nad drugim alternativama; (b) negativan tok Φ^- izražava koliko je neka alternativa dominirana od drugih, odnosno koliko ima „slabosti“ u odnosu na ostale alternative.

Zbir pozitivnog i negativnog toka daje globalni, tzv. potpuni tok dominacije

$$\Phi = \Phi^+ + \Phi^- \quad (1)$$

Kada se analizira parcijalna dominacija (PROMETHEE 1), posmatraju se istovremeno, ali razdvojeno, pozitivan i negativan tok i analitičar ima transparentnu informaciju o slabostima i jakostima alternativa. Kada se analizira potpuna, odnosno kompletna, dominacija (PROMETHEE 2), tada se pozitivni i negativni tok saberu kao u relaciji (1). Rangovi alternativa određeni putem PROMETHEE 2 analitičaru izgledaju „upečatljivije“, ali je u finalnom rezultatu sakrivena informacija o parcijalnim dominacijama među alternativama koju inače daje PROMETHEE 1.

Granične vrednosti indiferentnosti i preference, u zavisnosti od tipa funkcije H, kontrolišu se, kao što je rečeno, parametrima p, q i σ . Parametar p je prag značajnosti i predstavlja najmanje odstupanje dve

ocenjivane alternative koje treba smatrati značajnim, a približava se najvećem stepenu preference. Parametar q je prag indiferentnosti ili neznačajnosti i predstavlja najveće odstupanje između dve ocenjivane alternative koje treba smatrati neznačajnim. Parametar σ je Gausov prag značajnosti i predstavlja odstupanje između dve ocenjivane alternative, a koje se smatra srednjim stepenom preference. Sva tri parametra mogu se definisati alternativno kao celi brojevi ili kao procenti.

3. POSTOJEĆE I PLANIRANO NAVODNJAVANJE SEVERNE BAČKE

3.1. Planirani vodozahvati za navodnjavanje Severne Bačke

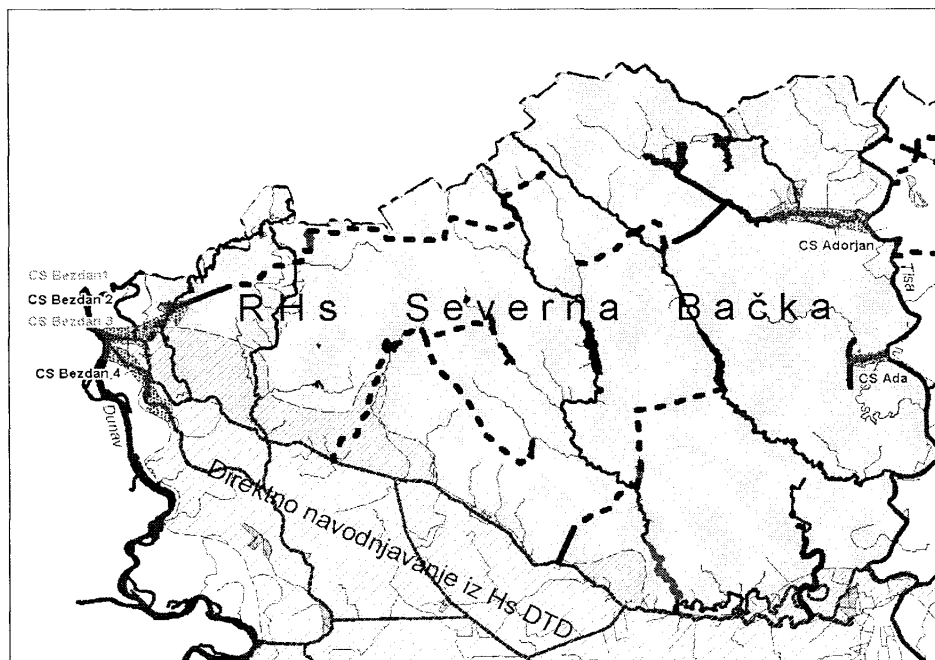
Hidrosistem Dunav–Tisa–Dunav (HsDTD) je višenamenski i obavlja sledeće osnovne funkcije: plovidba, odvodnjavanje, navodnjavanje, snabdevanje vodom industrije i ribnjaka, odvođenje stranih voda, odvođenje upotrebljenih i drugih korišćenih voda i sport i rekreacija. Na osnovu Investicionog programa sistema moguće je direktno navodnjavati 510.000 ha obradivih površina, od toga 210.000 ha u Bačkoj i 300.000 ha u Banatu. Indirektno navodnjavanje iz sistema planira se i projektuje izdvojeno, u obliku Programa razvoja regionalnih hidrosistema (RHs).

Navodnjavanje Severne Bačke je planirano višefaznom izgradnjom i razvojem RHs Severna Bačka. Zahvatanje vode za potrebe tog sistema je planirano iz dva pravca. Istočni deo bi se snabdevao već izgrađenim crpnim stanicama (CS) Adorjan i Ada iz Tise, dok bi se zapadni i južni deo snabdevali iz Dunava iz kanalske mreže HsDTD (Slika 3).

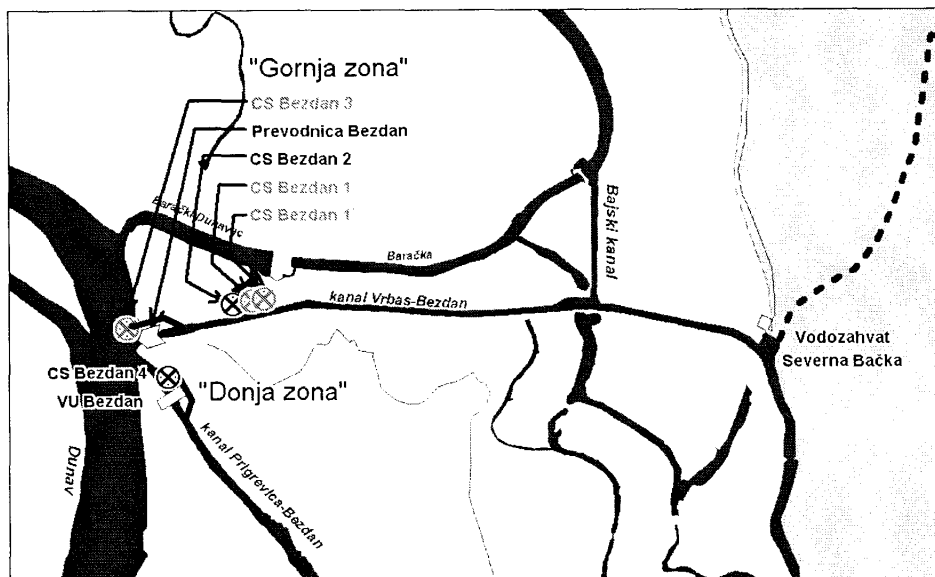
Planirani vodozahvati iz pravca Dunava se nalaze u blizini hidročvora Bezdán i hidročvora Bogojovo. Vodozahvati u blizini hidročvora Bezdán su razdvojeni na vodozahvat koji snabdeva kanal Prigrevica–Bezdán i vodozahvat za snabdevanje kanala Vrbas–Bezdán. Vodozahvat kanala Prigrevica–Bezdán (donja zona) čine postojeća vodozahvatna ustava Bezdán i CS Bezdán IV planirana u neposrednoj blizini ustave. Ovaj vodozahvat će snabdevati korisnike koji vodu zahvataju

direktno iz HsDTD. Vodozahvat kanala Vrbas–Bezdan (gornja zona), koji je predmet ove analize, planiran je na

najjužnijem delu kanala Vrbas–Bezdan, odnosno njegovom spoju sa Dunavom (Slika 4).



Slika 3. Pravci vodosnabdevanja RHs Severna Bačka



Slika 4. Gornja i donja zona vodozahvata Bezdán

3.2. Potrebe za vodom i mogućnosti postojećih objekata

Prema Programu razvoja navodnjavanja u AP Vojvodini, za navodnjavanje 210.000 ha poljoprivrednog zemljišta u Bačkoj potrebno je obezbediti 84 m³/s vode. Dodatne potrebe za vodom su iskazane projektom RHs Severna Bačka koji u finalnoj fazi predviđa navodnjavanje 148.000 ha na Telečkoj visoravni i zahvatanje dodatnih 64 m³/s. Od ukupnih količina vode koje treba zahvatiti i upustiti u HsDTD u periodu vršne potrošnje, na kanal Vrbas–Bezdan odnosi se 41 m³/s.

Trenutne maksimalne količine vode koje se mogu zahvatati na kanalu Vrbas–Bezdan iznose 18 m³/s, od čega 12 m³/s na CS Bezdan 2 i 6 m³/s na Bajskom kanalu. Na osnovu izloženog, nedostajuće količine vode iznose 23 m³/s.

Glavna vodozahvatna građevina za snabdevanje vodom ovog RHs nalazi se na 76+200 km kanala Vrbas–Bezdan, odnosno 4,68 km od uzvodnog kraja kanala (Slika 4).

3.3. Karakteristike glavnih postojećih objekata

Za snabdevanje vodom kanala Vrbas–Bezdan i održavanje neophodnih nivoa vode u kanalu, 1952. godine je izgrađena parna crpna stanica **Bezdan 1** maksimalnog kapaciteta 2x3 m³/s. Ova crpna stanica je već duže vreme van pogona jer su uklonjene parne mašine. Građevinski objekat je u ispravnom, mada vizuelno lošem stanju.

Za navodnjavanje 35.000 ha u zoni kanala Vrbas–Bezdan, 1957. godine izgrađena je crpna stanica **Bezdan 2** na električni pogon, maksimalnog kapaciteta 3x4 m³/s. Crpna stanica je dvosmerna, a postoji mogućnost gravitacionog provođenja vode u oba smera.

Prevodnica Bezdan je izgrađena 1856. godine na uzvodnom kraju kanala Vrbas–Bezdan i zadovoljava za prevođenje plovila do 500 t nosivosti. U kapiji prevodnice postoje 2 otvora sa tablastim zatvaračima kroz koje je moguće maksimalno upuštati do 6 m³/s.

Kanal Bezdan–Baja (Bajski kanal) dotiče iz Mađarske gde se snabdeva vodom iz Dunava posredstvom ustave Deak Ferenc. Međudržavnim sporazumom definisan je stalni protok ovog kanala od 6 m³/s [7]. Dužina kanala

kroz Srbiju iznosi 12,6 kilometara, računajući i dva kilometra zajedničkog sektora sa Mađarskom.

Kanal Vrbas–Bezdan je najstariji kanal u Bačkoj, građen u poslednjoj dekadi 18. i završen u prvoj dekadi 19. veka. Prvobitna trasa kanala je imala uzvodni kraj na Dunavu kod Bačkog Monoštora. Usled meandriranja, Dunav je pomerio korito ka zapadu tako da je prevodnica Bački Monoštor ostala bez kontakta sa Dunavom. Problem je rešen polovinom 19. veka produžavanjem kanala ka Bezdanu gde se korito Dunava stabilizovalo.

3.4. Potencijalni vodozahvati

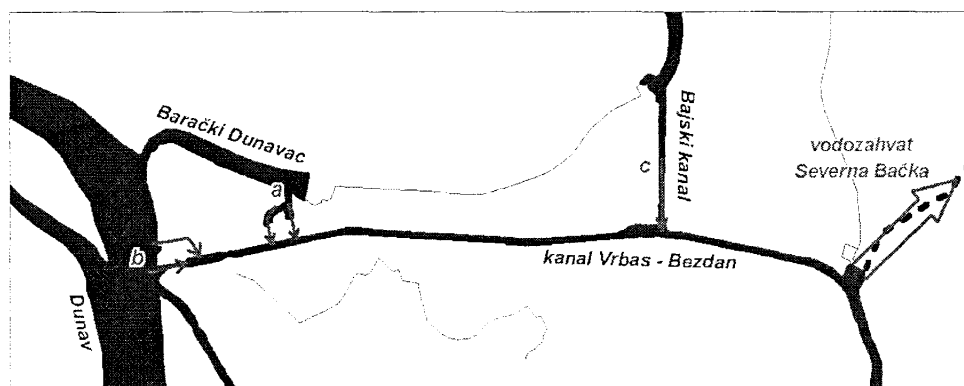
Dunav raspolaže dovoljnom količinom vode i povoljnim visinskim položajem. Režim reke je povoljan u vegetacionom periodu jer su u julu i avgustu relativno visoki vodostaji. Nedostajuće količine vode moguće je obezbediti neposredno i posredno iz reke sa sledećih lokacija (Slika 5):

a) **Barački Dunavac** koji je spojen sa Dunavom oko 600 metara uzvodno od prevodnice Bezdan i na njemu se već nalaze vodozahvati CS Bezdan 1 i Bezdan 2. Barački Dunavac predstavlja dovodni kanal za pomenute crpne stanice i nema dovoljan proticajni profil i dovoljnu dubinu da bi se mogla zahvatati neophodna količina vode.

b) **Direktni vodozahvat na Dunavu** kao pravac vodosnabdevanja bi mogao biti dimenzionisan i za veće povratne periode od zahtevanog. Postavljanje utopnih pumpi sa promenljivom kotom na stabilnoj građevini u koritu Dunava obezbeđuje rad u različitim, čak ekestremnim uslovima. Potencijalna lokacija crpne stanice nalazi se neposredno uzvodno od prevodnice Bezdan.

Kao direktan vodozahvat na Dunavu može se posmatrati i prevodnica Bezdan jer se nalazi u neposrednoj blizini spoja kanala Vrbas–Bezdan i Dunava.

c) **Bajski kanal** predstavlja delimično uređen i kanalisani meandar Dunava dužine 44,8 kilometara od kojih se 10,6 kilometara nalazi u Srbiji, a 2 kilometra predstavljaju državnu granicu sa Mađarskom. Uzvodni deo kanala se nalazi u Mađarskoj i pozicioniran je neposredno nizvodno od grada Baja. Voda se zahvata iz Dunava posredstvom vodozahvatne ustave Deak Ferenc. Režim rada ustave Deak Ferenc i režim nivoa vode u Bajskom kanalu regulisani su međudržavnim sporazumom.



Slika 5. Potencijalni posredni i neposredni pravci zahvatanja vode za RHs Severna Bačka

3.5. Predviđena izgradnja novih i revitalizacija postojećih objekata

• CS Bezdán 1

Revitalizacija ove crpne stanice predviđa dokopavanje dovodnog kanala i povećanje proticajnog profila, građevinske radove na objektu crpne stanice, vodozahvatne i ispusne građevine, elektromontažne i mašinske radove, kao i nabavku agregata i opreme za crpnu stanicu i trafo stanicu. Ukupna cena za revitalizaciju iznosi $1,25 \times 10^6$ €. Predviđena je **izgradnja nove crpne stanice** u neposrednoj blizini postojeće. Nova stanica bi koristila isti dovodni kanal kao vodozahvat i istu trafo stanicu. Ukupna cena svih radova i sve potrebne opreme za izgradnju ove stanice procenjuju se na oko $1,18 \times 10^6$ €.

• CS Bezdán 2

Revitalizacija ove stanice predviđa dokopavanje dovodnog kanala i povećanje proticajnog profila, „spuštanje dna“ crpilišta i „prilagodavanje“ agregata za povećanje kapaciteta sa $12 \text{ m}^3/\text{s}$ na $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Ukupna cena revitalizacije procenjena je na $0,645 \times 10^6$ €.

CS Bezdán 3

Izgradnja ove stanice je predviđena u koritu Dunava, uzvodno od prevodnice Bezdán. Ukupna cena svih radova i potrebne opreme iznose $3,86 \times 10^6$ €. Minimalni radni nivo stanice dozvoljava zahvatanje vode i pri prevazilaženju pojave 20-godišnjih malih voda.

• Ustava Deak Ferenc

Međudržavnim sporazumom sa Mađarskom definisan je protok Bajskog kanala od $6 \text{ m}^3/\text{s}$ na graničnom profilu.

U periodu visokih i srednjih voda, postojeća ustava Deak Ferenc dopušta upuštanje dodatna $4 \text{ m}^3/\text{s}$, bez dodatnih radova i ulaganja. Dodatne količine vode na ustavi morale bi biti definisane novim pogonskim pravilnikom rukovanja kanalom Bezdán–Baja.

• Prevodnica Bezdán

Ova prevodnica ima dvostruku uzvodnu kapiju koja trenutno nije u funkciji. Da bi se na prevodnici ostvario proticaj od $6 \text{ m}^3/\text{s}$, neophodna je potpuna rekonstrukcija obe kapije na dunavskoj strani. Ocena je da je rekonstrukcija opravdana samo u okviru rekonstrukcije celog objekta i iznosi $1,30 \times 10^6$ €. U pogledu zahvatanja vode, na ovaj objekat se može računati oko 70 dana u periodu najintenzivnijeg navodnjavanja jun – avgust.

4. POSTAVKA VIŠEKRITERIJUMSKOG PROBLEMA

4.1. Cilj

Kao dovoljno opšti u ovom radu je definisan sledeći cilj: Izabrati jednu od više tehnički izvodljivih varijanti izgradnje objekata za snabdevanje vodom kanala Vrbas–Bezdan poštuovanjem više odabranih, delimično konfliktnih, ciljeva.

4.2. Kriterijumi

Odabrana su četiri kriterijuma kako sledi:

- **Cena.** Ovo je minimizacioni kriterijum koji se odnosi na troškove investicije izražene u 10^6 €, odnosno na cenu izgradnje i/ili rekonstrukcije predloženih objekata.
- **Upravlјivost.** Ovo je maksimizacioni kriterijum koji tretira stepen tzv. samostalne upravljivosti sistemom,

odnosno „odgovora“ na sledeće pitanje: „U kojoj meri upravljivost sistema, bez obzira na raspoložive količine vode, zavisi isključivo od investitora, odnosno upravljača sistemom?“. Pitanje se postavlja zbog postojanja vodozahvatnog kraka na teritoriji druge države i pridržavanja te države sklopljenim sporazumima. Na primer, važeći sporazum sa Mađarskom za Bajski kanal ne sadrži nikakve kaznene odredbe (sa penalima ili sankcijama) za slučaj nepoštovanja sporazuma.

Prethodno postavljeno pitanje je od značaja i u slučaju zahvatanja vode iz Baračkog Dunavca. Ovaj meandar je sastavni deo parka prirode i zaštićenog staništa retkih ptica Gornje Podunavlje, a samim tim je pod posebnom pažnjom republičkih i pokrajinskih resora za zaštitu životne sredine. Koncept upravljivosti je ovde postavljen na originalni način. Naime, smatra se da se rad vodozahvatnih objekata može „zaustaviti“ u nekim periodima godine od strane upravljačkih, odnosno nadležnih institucija. Ovakvi postupci nisu toliko izvesni, ali se moraju predvideti sa nekim maksimalnim mogućim učešćem, na primer 10%. Upravljivost u smislu procenta samostalne upravljivosti sistemom može se računati prema obrascu:

$$U = [(Q_u - (Q_{bk} + 0.1 \cdot Q_{bd})) / Q_u] \cdot 100 \quad (2)$$

gde su: U – upravljivost sistemom, Q_u – ukupan proticaj vode u sistemu, Q_{bk} – proticaj vode koja u sistem ulazi iz Bajskog kanala, a Q_{bd} – proticaj koji se obezbeđuje iz Baračkog Dunavca.

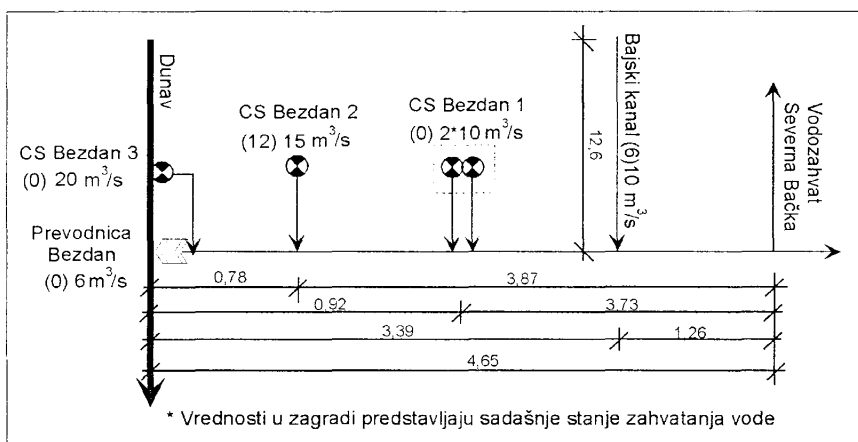
• **Eko efekti.** Ekološki efekti vodozahvatnih objekata mogu se posmatrati u smislu uticaja ovih objekata na životnu sredinu, narušavanje vizuelnog izgleda u zoni objekta i uticaja na kvalitet vode u kanalu Vrbas–

Bezdan i Bajskom kanalu. Svi planirani i postojeći objekti imaju električni pogon tako da ne emituju štetne gasove niti ispuštaju opasne materije na okolno zemljište ili u kanalsku mrežu. Buka koju emituju ovi objekti u radu ne utiče štetno na životinjski svet jer su značajnija životinjska staništa na dovoljnoj udaljenosti. Kako se svi neizgrađeni objekti nalaze u zonama u kojima već postoje objekti, neće biti značajnijeg menjanja vizuelnog izgleda predmetnog prostora. Dodatne količine vode u kanalskoj mreži povoljno utiču na kvalitet vode usled efekta razblaživanja, ali i povećanja moći samoprečišćavanja. Povoljan efekat se ogleda u povećanju brzine vode u koritu koji uzrokuje uvećanje rastvorenog kiseonika i sprečavanje zamuljivanja. Ukupna dužina kanalske mreže koja bi mogla biti obuhvaćena povećanjem protoka iznosi 17,28 km (slika 6), od kojih se na Bajski kanal odnosi 12,6 km. Ovaj kriterijum je bitan jer različite varijante utiču na različite vodotoke i daju veće ili manje efekte. Po usvojenoj pretpostavci, eko-efekte treba maksimizirati prema obrascu:

$$E = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \cdot d_i \quad (3)$$

gde su: E – eko efekti, d_i je dužina kanala i na kojoj dolazi do uvećanja proticaja ΔQ_i . Sumiranje se vrši po svim deonicama kanala kojih može biti n .

• **Troškovi.** Ukupni godišnji troškovi rada sistema, izraženi u 10^5€ , obuhvataju ukupne troškove održavanja, pogonske troškove sistema za jednu godinu (na osnovu 1.920 časova rada crpnih stanica punim kapacitetom) i troškove na zarade zaposlenih na održavanju i korišćenju objekata. Kriterijum je, naravno, minimizacioni.



Slika 6. Dužine deonica na kanalu Vrbas – Bezdan i Bajskom kanalu

4.3. Varijante (alternative)

• **Varijanta 1.** Predložena varijanta predviđa revitalizaciju postojećih crpnih stanica CS Bezdán 1 i 2, kao i izgradnju dodatne CS Bezdán 1. Računajući garantovani protok na Bajskom kanalu od $6 \text{ m}^3/\text{s}$, ukupan kapacitet kanala Vrbas - Bezdán iznosio bi zahtevanih $41 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 7).

Ukupni troškovi investicije predstavljaju zbir toškova investicije za revitalizaciju stanica 1 i 2 i za izgradnju nove stanice Bezdán 1 iznose:

$$(0,645+1,25+1,18) \times 10^6 \text{ €} = 3,075 \times 10^6 \text{ €}.$$

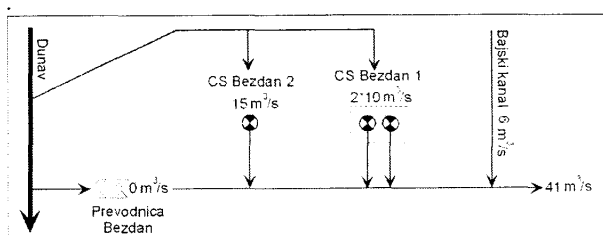
Ukupni troškovi rada sistema se zasnivaju na troškovima održavanja, troškovima pogona i ukupnim troškovima zarada zaposlenih na objektima i iznose 282.690 €.

Upravljalivost sistemom zavisi od zahvaćenih voda iz Baračkog Dunavca i Bajskog kanala; izračunava se prema obrascu (2) i za ovu varijantu iznosi:

$$U = [(41 - (6 + 0.1 \cdot 35)) / 41] \cdot 100 = 76,83 \%$$

Pozitivni Eko – efekti su u funkciji povećanja proticaja na kanalu Vrbas–Bezdán i izračunavaju se prema obrascu (3). Za ovu varijantu pozitivni ekološki efekti iznose:

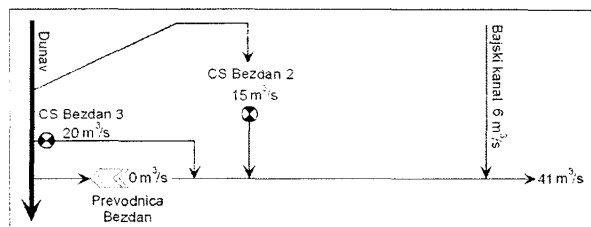
$$E = [0 \times 4,65 + 3 \times 3,87 + (10 + 10) \times 3,73 + 0 \times 1,26 + 0 \times 12,6] = 86,21 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}.$$



Slika 7. Varijanta 1

• **Varijanta 2.** Predložena varijanta predviđa revitalizaciju postojeće CS Bezdán 2, kao i izgradnju CS Bezdán 3. Računajući garantovani protok na Bajskom kanalu od $6 \text{ m}^3/\text{s}$, ukupan kapacitet kanala Vrbas- Bezdán iznosio bi zahtevanih $41 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 8).

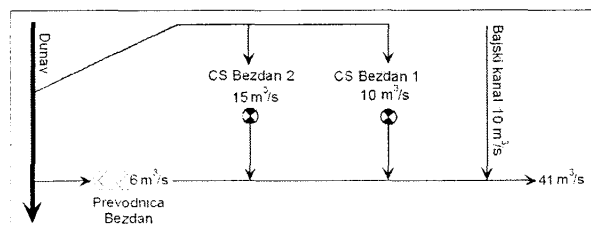
Ukupni troškovi investicije iznose $4,505 \times 10^6 \text{ €}$, a ukupni troškovi rada sistema 314.770 €. Sistem je 81,71 % upravljiv, a pozitivni ekološki efekti su $104,61 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$.



Slika 8. Varijanta 2

• **Varijanta 3.** Ovde se predviđa revitalizacija postojećih CS Bezdán 1 i 2, kao i povećanje proticaja Bajskog kanala na $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Dodatnih $6 \text{ m}^3/\text{s}$ obezbedilo bi se zahvatanjem na kapiji prevodnice Bezdán. Ukupan kapacitet kanala Vrbas-Bezdán, po ovoj varijanti, iznosio bi $41 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 9).

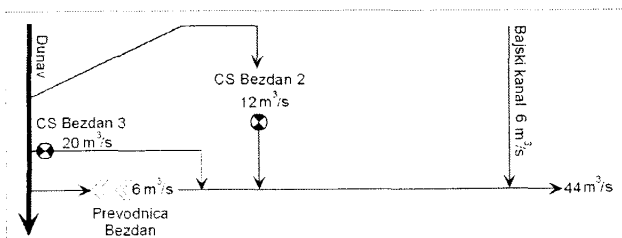
Ukupni troškovi investicije iznose $3,195 \times 10^6 \text{ €}$, a ukupni troškovi rada sistema 245.170 €. Sistem je 62,51 % upravljiv, a pozitivni ekološki efekti su $132,25 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$.



Slika 9. Varijanta 3

• **Varijanta 4.** Predložena varijanta predviđa zadržavanje CS Bezdán 2 u nerekonstruisanom stanju, izgradnju CS Bezdán 3, kao i zahvatanje $6 \text{ m}^3/\text{s}$ na kapiji prevodnice Bezdán. Uz garantovani protok na Bajskom kanalu od $6 \text{ m}^3/\text{s}$, ukupan kapacitet kanala Vrbas-Bezdán iznosio bi $44 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 10).

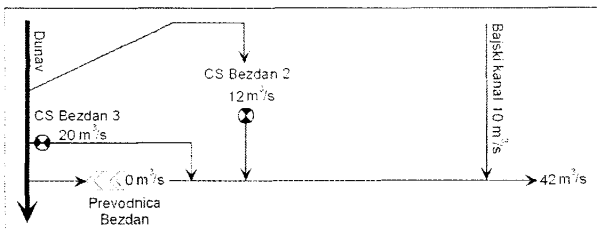
Ukupni troškovi investicije za ovu varijantu iznose $5,16 \times 10^6 \text{ €}$, ukupni troškovi rada sistema 333.280 €, sistem je 83,64 % upravljiv, a pozitivni ekološki efekti su $120,90 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$.



Slika 10. Varijanta 4

• **Varijanta 5.** Predložena varijanta predviđa zadržavanje CS Bezdán 2 u nerekonstruisanom stanju, izgradnju CS Bezdán 3, kao i povećanje proticaja Bajskog kanala na $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Ukupan kapacitet kanala Vrbas-Bezdán iznosio bi $42 \text{ m}^3/\text{s}$ (slika 11).

Ukupni troškovi investicije u ovom slučaju su 3.86×10^6 €, ukupni troškovi rada sistema 301.200 €, sistem je $73,33 \%$ upravljiv, a pozitivni ekološki efekti su $148,44 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$.



Slika 11. Varijanta 5

5. VREDNOVANJE VARIJANTI IZGRADNJE VODOZAHVATNOG SISTEMA BEZDAN METODOM PROMETHEE

Višekriterijumski problem formulisan u poglavljima 3 i 4 sastoji se u vrednovanju i rangiranju pet predloženih varijanti izgradnje vodozahvatnog sistema Bezdán u odnosu na četiri identifikovana kriterijuma: dva minimizaciona (cena i troškovi) i dva maksimizaciona (upravljivost i eko-efekti). Za ovu svrhu korišćen je višekriterijumski metod PROMETHEE opisan u poglavlju 2, realizovan putem Decision Lab 2000 softvera dostupnog na Internetu [5]. Navedeni softver omogućava rad po oba tipa metoda PROMETHEE: tipa 1 (sa delimičnim rangiranjem) i tipa 2 (sa potpunim rangiranjem). Zbog konciznosti ova dva tipa će dalje biti navođena kao P1 i P2, respektivno. Softver je korisnički orijentisan sa dobrim interfejsom koji omogućava jednostavan i transparentan unos podataka za alternative, kriterijume i težinske vrednosti kriterijuma. Dalje, softver pruža mogućnost pojedinačnog isključivanja kriterijuma iz procesa vrednovanja alternativna, kao i mogućnost isključivanja alternativna i ispitivanja moguće promene rangova preostalih alternativna.

Analizirani su različiti scenariji izgradnje vodozahvatnog sistema Bezdán. Na početku analize

težinske vrednosti pojedinačnih kriterijuma iskustveno su definisane kako sledi:

Cena ($w_1 = 0,40$), Upravljalivost ($w_2 = 0,25$),

Eko efekti ($w_3 = 0,15$), Troškovi ($w_4 = 0,20$)

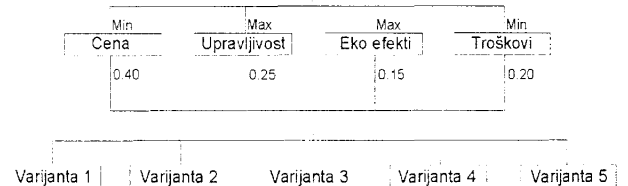
$$(w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1)$$

U Tabeli 1 sabrana je informacija o „performansi“ svake varijante u odnosu na svaki od usvojenih kriterijuma, a na slici 12 skicirana je hijerarhija problema odlučivanja.

Tabela 1. Matrica performanse

| Kriterijum | K1 | K2 | K3 | K4 |
|-------------|---------------------|-----------------------|---|-------------------------|
| | Cena [10^6 €] | Upravljalivost [%] | Eko – efekti [$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$] | Troškovi [10^3 €] |
| | $w_1=0,40$ | $w_2=0,25$ | $w_3=0,15$ | $w_4=0,20$ |
| Varijanta | min | max | max | min |
| Varijanta 1 | 3,075 | 76,83 | 86,21 | 282,69 |
| Varijanta 2 | 4,505 | 81,71 | 104,61 | 314,77 |
| Varijanta 3 | 3,195 | 69,51 | 132,25 | 245,17 |
| Varijanta 4 | 5,160 | 83,64 | 120,90 | 333,28 |
| Varijanta 5 | 3,860 | 73,33 | 148,44 | 301,20 |

CILJ



Slika 12. Hijerarhija problema odlučivanja

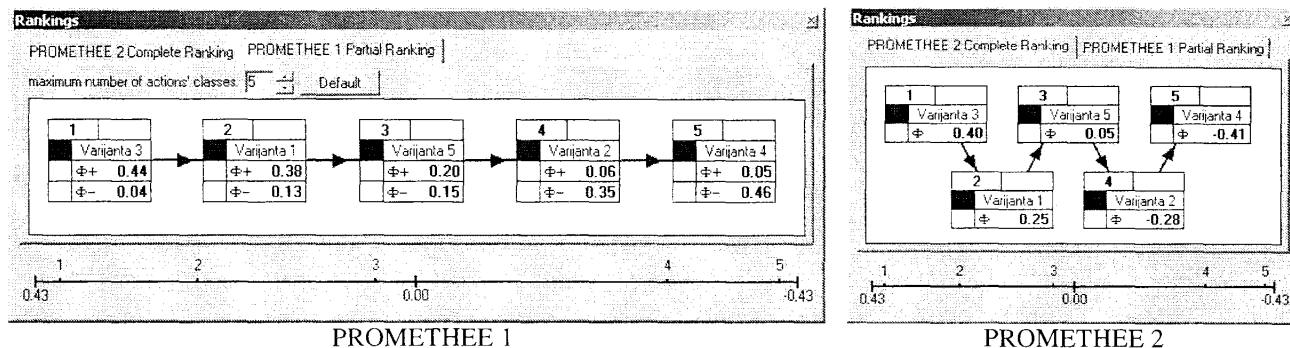
5.1. Scenariji

• Scenario 1

Za kriterijume „cena“ i „troškovi“ u ovom scenariju je korišćena funkcija preference linearnog tipa, dok je za „eko“ i „upravljivost“ korišćena funkcija V oblika. Parametri funkcija za ovaj, kao i za druge scenarije, dati su u Tabeli 2.

Prema ovom scenariju, varijante su po oba tipa metoda (P1 i P2) rangirane na isti način (Slika 13):

$$\text{Var 3} > \text{Var 1} > \text{Var 5} > \text{Var 2} > \text{Var 4.}$$



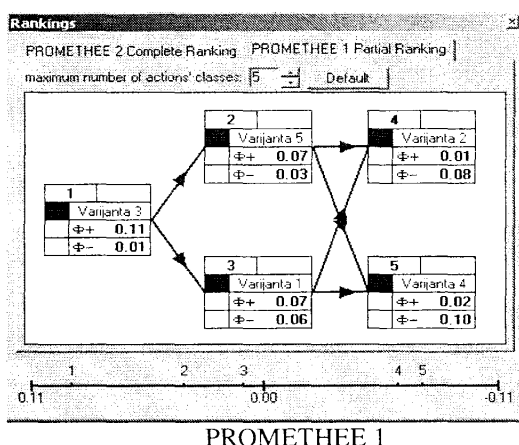
Slika 13. Parcijalno i kompletno rangiranje alternativa za scenario 1

• Scenario 2

U ovom scenariju promenjeni su neki tipovi funkcija preference i pragovi značajnosti i indiferentnosti. Za sve kriterijume je primenjen linearni tip funkcije preference i dati su jednaki pragovi značaja preference $p = 100\%$ i indiferentnosti $q = 10\%$.

Parcijalno rangiranje (P1), prikazano na slici 14, pokazuje primetno odsustvo smerova dominacije između varijanti 5 i 1, ali i varijanti 2 i 4, zbog čega bi rangiranje bilo uspostavljeno na sledeći način:

$$\text{Var 3} > \text{Var 1} = \text{Var 5} > \text{Var 2} = \text{Var 4.}$$



Slika 14. Parcijalno i kompletno rangiranje alternativa za Scenario 2

• Scenario 3

Ovaj scenario je zasnovan na promeni težinskih vrednosti kriterijuma, čime je simulirana moguća promena preferenci donosioca odluka. Ovdje je upravljivost vrednovana sa 35%, eko efekti sa 30%, cena sa 20% i troškovi sa 15%, a varijante su rangirane:

$$\text{Var 3} > \text{Var 5} \geq \text{Var 1} > \text{Var 2} \geq \text{Var 4.}$$

• Scenario 4

Kako je varijanta 4 po prethodna tri scenarija bila najslabije rangirana, u scenariju 4 ona je isključena iz vrednovanja, a sve ostalo (tipovi funkcija preference,

parametri i težine kriterijuma) je isto kao u scenariju 1. Postupak isključivanja najslabije rangirane varijante je logičan jer uklanja iz metoda nepotrebno uparivanje ostalih varijanti sa ovom varijantom. Rangiranje prema ovom scenariju je:

$$\text{Var 3} > \text{Var 1} > \text{Var 5} > \text{Var 2.}$$

• Scenario 5

Kao i prethodni, ovaj scenario izuzima varijantu 4, s tim da su korišćeni parametri funkcija preference i težinske vrednosti kao u scenariju 2. Rezultat vrednovanja je:

$$\text{Var 3} > \text{Var 5} > \text{Var 1} > \text{Var 2.}$$

• Scenario 6

Ovde je, kao i u scenarijima 4 i 5, izostavljena varijanta 4, a koriste se parametri funkcija preference i težinske vrednosti kriterijuma kao u scenariju 3. Dobijeno je sledeće rangiranje:

$$\text{Var 3} > \text{Var 5} \geq \text{Var 1} > \text{Var 2.}$$

U tabeli 2 sabrane su sve korišćene funkcije preferenci, parametri, težinske vrednosti kriterijuma i varijante koje su vrednovane za svaki od 6 scenarija. U tabeli 3 sabrana su na jednom mestu dobijena rangiranja alternativa po scenarijima.

Tabela 2. Korišćene funkcije preferenci i drugi elementi analize za različite scenarije

| Kriterijum Scenario | Rangirane varijante | Cena | | Upravlјivost | | Eko-efekti | | Troškovi | |
|------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| | | tež. vredn. w_1 | funkcija preference | tež. vredn. w_2 | funkcija preference | tež. vredn. w_3 | funkcija preference | tež. vredn. w_4 | funkcija preference |
| 1 | 1.2.3.4.5 | 0.40 | Linearna $p = 30\%$ $q = 15\%$ | 0.25 | V oblika $p = 100\%$ | 0.15 | V oblika $p = 100\%$ | 0.20 | Linearna $p = 6$ $q = 26$ |
| 2 | 1.2.3.4.5 | 0.40 | Linearna $p = 10\%$ $q = 100\%$ | 0.25 | Linearna $p = 10\%$ $q = 100\%$ | 0.15 | Linearna $p = 10\%$ $q = 100\%$ | 0.20 | Linearna $p = 10\%$ $q = 100\%$ |
| 3 | 1.2.3.4.5 | 0.20 | Linearna $p = 30\%$ $q = 15\%$ | 0.35 | V oblika $p = 100\%$ | 0.30 | V oblika $p = 100\%$ | 0.15 | Linearna $p = 6$ $q = 26$ |
| 4 | 1.2.3.5 | 0.40 | Linearna $p = 30\%$ $q = 15\%$ | 0.25 | V oblika $p = 100\%$ | 0.15 | V oblika $p = 100\%$ | 0.20 | Linearna $p = 6$ $q = 26$ |
| 5 | 1.2.3.5 | 0.40 | Linearna $p = 10\%$ $q = 100\%$ | 0.25 | Linearna $p = 10\%$ $q = 100\%$ | 0.15 | Linearna $p = 10\%$ $q = 100\%$ | 0.20 | Linearna $p = 10\%$ $q = 100\%$ |
| 6 | 1.2.3.5 | 0.20 | Linearna $p = 30\%$ $q = 15\%$ | 0.35 | V oblika $p = 100\%$ | 0.30 | V oblika $p = 100\%$ | 0.15 | Linearna $p = 6$ $q = 26$ |

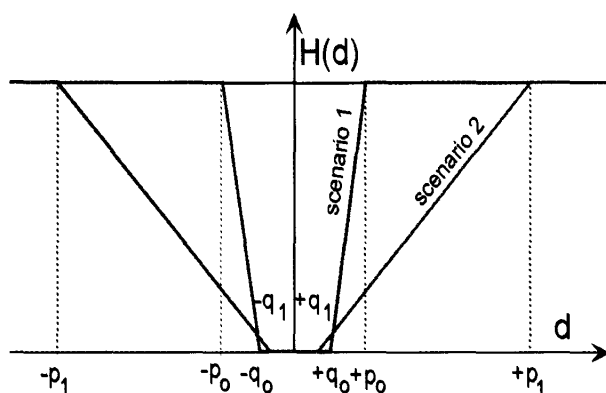
Tabela 3. Rangovi varijanti za različite scenarije

| Scenario | Rangiranje | | | | | Najbolja varijanta |
|----------|-------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--------------------|
| 1 | Variјanta 3 | Variјanta 1 | Variјanta 5 | Variјanta 2 | Variјanta 4 | Variјanta 3 |
| 2 | Variјanta 3 | Variјanta 5 \geq Variјanta 1 | | Variјanta 2 \geq Variјanta 4 | | Variјanta 3 |
| 3 | Variјanta 3 | Variјanta 5 \geq Variјanta 1 | | Variјanta 2 \geq Variјanta 4 | | Variјanta 3 |
| 4 | Variјanta 3 | Variјanta 1 | Variјanta 5 | Variјanta 2 | - | Variјanta 3 |
| 5 | Variјanta 3 | Variјanta 5 | Variјanta 1 | Variјanta 2 | - | Variјanta 3 |
| 6 | Variјanta 3 | Variјanta 5 \geq Variјanta 1 | | Variјanta 2 | - | Variјanta 3 |

5.2. Diskusija rezultata

Upoređenjem rangova alternativa za svaki scenario može se zaključiti da je rang varijante 3 ostao nepromenjen i da ova varijanta predstavlja najbolje rešenje. Prema scenariju 1 i 4, sledeća po rangju je varijanta 1, a prema scenariju 5 drugoplasirana je varijanta 5. Ostala tri scenarija (2, 3 i 6) daju izjednačene rangove varijanti 1 i 5, s tim da se prednost, po sva tri scenarija, daje varijanti 5.

Upoređujući scenario 1 i scenario 2, uočava se zamena mesta drugoplasirane i trećeplasirane varijante, koja je nastala zbog promene tipa funkcije preference. Ova promena ima poseban značaj u slučaju kriterijuma „eko efekti“, koji se maksimizira. Varijanta 1 beleži najnižu vrednost za ovaj kriterijum, dok je ova vrednost za varijantu 5 ukupno najbolja. Dodatni razlog za promenu rangova leži u povećanju praga značajnosti preference za kriterijum „cena“. Iako vrednosti za ovaj kriterijum nisu toliko udaljene, značajno je promenjen nagib funkcije preference (Slika 15) u scenariju 2, a on smanjuje dominaciju varijante 1 u odnosu na varijantu 5 po tom kriterijumu.



Slika 15 Promena nagiba funkcije preference

Promena nagiba funkcije preference u scenariju 2 utiče i na smanjenje pozitivnog i negativnog toka dominacije, odnosno, smanjenje stepena međusobne dominacije i dominiranosti varijanti.

Poređenjem rangova iz scenarija 1 i scenarija 3, ponovo se uočava zamena rangova varijante 1 i varijante 5, što je posledica smanjenja težinske vrednosti kriterijuma „cena“. Po ovom kriterijumu, varijanta 1 ima najbolju vrednost, a umenjenjem težinske vrednosti kriterijuma smanjuje se dominacija varijante 1 nad ostalim

varijantama. Povećanje težinske vrednosti kriterijuma „eko efekti“ dodatno doprinosi ukupno boljem rangju varijante 5, jer za ovaj kriterijum varijanta 1 ima najslabije, a varijanta 5 najbolje vrednosti.

Promena funkcija preferenci i njihovih parametara kao i težinskih vrednosti kriterijuma koja nastaje poređenjem scenarija 2 i 3 nije rezultovala promenom rangova. Razlike, nastale promenom funkcija preferenci i pragova značajnosti i indiferentnosti, su kompenzovane promenom težinskih vrednosti kriterijuma.

Međusobnim poređenjem scenarija 1 i 4, 2 i 5, kao i scenarija 3 i 6, ustanovljava se efekat isključenja najslabije rangirane varijante na rangiranje ostalih varijanti po scenarijima 1, 2 i 3.

Poređenjem scenarija 1 i scenarija 4, nije uočena promena rangova varijanti jer su po scenariju 1 međuvarijantne razlike pozitivnih i negativnih tokova dominacije bile dovoljno izražene. Isključivanje varijante 4 iz analize nije imalo efekta na rangiranje ostalih varijanti.

Bitnih promena nema ni poređenjem scenarija 2 i scenarija 5, osim u pojavi parcijalne dominacije drugoplasirane varijante 5 u odnosu na varijantu 1. Pojava parcijalne dominacije varijante 5 u odnosu na varijantu 1 je posledica isključivanja iz analize dominantnosti ove dve varijante prema varijanti 4.

Poređenjem scenarija 3 i scenarija 6 nije uočena promena rangova varijanti, jer isključivanje varijante 4 nije imalo značaja.

6. ZAKLJUČAK

Predloženo je pet varijanti za izgradnju sistema za vodosnabdevanje Bezdana koje su ocenjivane metodom PROMETHEE pomoću softvera Decision Lab 2000. Metod PROMETHEE spada u meke optimizacione višekriterijumske metode. Višekriterijumska analiza predloženih varijanti je sprovedena za četiri postavljena kriterijuma i šest scenarija parametrizacije procesa odlučivanja.

Pojedini kriterijumi korišćeni u ovom radu su međusobno u konfliktu, kao što je, na primer, slučaj i sa dva specijalno uvedena kriterijuma: (a) samostalna upravljivost sistemom i (b) eko efekti. Ideja merenja

eko efekata mogućih tehničkih rešenja za predmetni vodozahvatni sistem je da su isti utoliko veći ukoliko se više vode zahvata na Bajskom kanalu; posledica je da je tada sistem manje samostalno upravljiv i konflikt među kriterijumima je jasan. Inače, dva navedena kriterijuma su originalnim putem prevedena iz kvalitativnog u kvantitativni domen i na taj način stavljeni u uporedivu metriku sa druga dva korišćena, egzaktno kvantitativna, kriterijuma („cene“ i „troškovi“).

Od predloženih varijanti tehničkih rešenja koje su ocenjivane, varijanta 3 je u svim analiziranim višekriterijumskim scenarijima bila najbolje rangirana (videti Tabelu 3). Ona predviđa revitalizaciju crpnih stanica Bezdana 1 i 2, kao i rekonstrukciju prevodnice Bezdana. Dodatne količine vode iz Bajskog kanala su uslovljene postizanjem novog međudržavnog sporazuma sa Mađarskom. Po ovoj varijanti troškovi investicija nisu najniži, ali su najniži ukupni godišnji troškovi rada sistema (videti Tabelu 1); ekološki efekti vodozahvatnih objekata su po svojoj nominalnoj vrednosti na drugom mestu na listi svih varijanti. Zanimljivo je da je varijanta najbolje rangirana, iako je po kriterijumu samostalne upravljivosti sistemom najslabija. Konačno, treba naglasiti da je slabija samoupravljaljivost ove varijante logična posledica tehničkog rešenja koje se zasniva na zahvatanju vode iz Baračkog Dunavca i Bajskog kanala.

LITERATURA

- [1] Brans J. P., Mareschal B.: How to Decide with PROMETHEE, ULB and VUB Brussels Free University
<http://www.visualdecision.com/Pdf/How%20to%20use%20PROMETHEE.pdf>
- [2] Mohanty B.K: A Multi-objective Decision Making Model for E-Business – A Fuzzy Approach, Indian Institute of Management LUCKNOW – 226 013, INDIA, 2004.
- [3] Srđević B., Srđević Z., Zoranović T.: Promethee, Topsis i CP u višekriterijumskom odlučivanju u poljoprivredi, Letopis naučnih radova 26 (1), 2002.
- [4] Srđević B., Srđević Z.: Višekriterijumska analiza mogućnosti korišćenja deonica kanalske mreže u Vojvodini, Studija, Faza I, Studija, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 2005.
- [5] +++ Decision Lab 2000,
<http://www.visualdecision.com/dlab>
- [6] +++: Generalni projekat snabdevanja vodom HsDTD kod Bezdana, Energoprojekt, Hidroinženjering Beograd, 2006.
- [7] +++: Zajednički Pogonski Pravilnik kanala Bezdana-Baja, Međudržavna komisija, Novi Sad – Baja, 1980.

MULTICRITERIA ANALYSIS OF ALTERNATIVES FOR THE RECONSTRUCTION OF REGIONAL WATER SUPPLY SYSTEMS BY MEANS OF THE PROMETHEE METHOD

by

Ratko BAJCETIC, B.Sc., Vode Vojvodine – Public Water Management Company
Bul. M. Pupina 25, 21000 Novi Sad, Serbia
rbajcetic@vodevojvodine.com

Bojan SRDJEVIC, Prof. Dr., Department for Water Management, Faculty of Agriculture, University of Novi Sad
Trg D. Obradovica 8, 21000 Novi Sad, Serbia
bojans@polj.ns.ac.yu

Summary

A complete multicriteria analysis is presented for the selection of the best among several technical alternatives aiming at the reconstruction of regional water supply systems in the province of Vojvodina in Serbia. The focus is on manipulating the criteria selected by different scenarios and their analysis by applying the PROMETHEE method. In particular, two original qualitative criteria (self-control capability and ecological effects) are introduced and adjusted so as to fit within a unique quantitative framework, and especially introducing two standard economic criteria

(direct costs and investment expenditures). Formulated in a standard way for the regional water supply system "Bezdan", the decision problem is resolved by the PROMETHEE method, by developing several scenarios of manipulation, defining preference functions and their parameters, criteria weights and else. All results are discussed in detail and conclusions are proposed accordingly.

Key words: multicriteria decision making, water supply system, PROMETHEE

Redigovano 05.12.2007.