

VIŠEKRITERIJUMSKO VREDNOVANJE NAMENA AKUMULACIJE

Prof. dr Bojan SRĐEVIĆ
Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Novom Sadu

REZIME

U radu je opisano vrednovanje i rangiranje namena akumulacije metodima višekriterijumske optimizacije TOPSIS, PROMETHEE 2, CP i AHP. Ukupno 6 namena akumulacije (proizvodnja elektrine energije, navodnjavanje, odbrana od poplava, snabdevanje vodom, turizam i rekreacija i rečni saobraćaj) vrednovano je u odnosu na 5 ekonomskih kriterijuma (povećanje nacionalnog dohotka, povećanje priliva sredstava iz inostranstva, uravnoteženje režima plaćanja, supstitucija uvoza iz inostranstva i porast regionalnog dohotka). Na ilustrativnom primeru pokazano je da metodi uglavnom jednako identifikuju najbolje i najgore alternative (namene).

Ključne reči: namene akumulacije, višekriterijumska optimizacija, TOPSIS, PROMETHEE 2, CP, AHP

1. UVOD

Donošenje odluka najčešće znači vrednovanje skupa mogućih rešenja ili alternativa. Kada se vrednovanje vrši u odnosu na jedan kriterijum, određuje se rešenje (alternativa) koje ekstremizira ciljnu funkciju, a postupak se označava kao jednokriterijumska optimizacija, ili samo optimizacija. Stvari se komplikuju kada ima dva ili više kriterijuma i kada umesto optimalnog treba naći najbolje rešenje. Svaki vid objedinjavanja kriterijuma u jedan (potpuna skalarizacija) i svođenje zadatka na jednokriterijumski unosi nedostatke koji limitiraju domete analize i tačnost rezultata.

Umesto potpune skalarizacije, višekriterijumski problem se najčešće tretira u originalnom obliku, a nivo skalarizacije ciljne funkcije kontroliše donosilac odluka ili analitičar. Drugim rečima, donosilac odluka najčešće

međusobno vrednuje kriterijume, ili im direktno daje rangove značajnosti i tako oblikuje ciljnu funkciju po sopstvenim preferencama. Bilo da to čini indirektno ili direktno, u datoj fazi procesa odlučivanja formira se matrica alternativa i kriterijuma koja se podvrgava analizi i obradi da bi se iz nje generisao konačni rezultat - težinske ocene alternativa na osnovu kojih se iste zatim rangiraju. Težinske ocene i rangovi mogu se koristiti pojedinačno ili integralno u zavisnosti od vrste problema. Ako se traži samo najbolja alternativa, obično je dovoljno samo rangiranje. Kada se radi o alokacionim problemima, težinske ocene mogu označavati proporcije alokacije resursa prema rangovima alternativa. Treći slučaj je da se želi identifikacija prvih nekoliko najboljih alternativa i stepen njihovog učešća u ukupnoj alokaciji resursa.

Višestruki kriterijumi, hijerarhijske strukture i različite metrike prostora odluka i kriterijuma deo su složenog ambijenta sa kojim se analitičari sreću u tretiranju problema donošenja odluka i kreiranju kvalitetnih metoda za njihovo rešavanje u praksi. Prisustvo različitih kriterijuma, od kojih neke treba maksimizirati a neke minimizirati, znači da se odluke donose u konfliktnim uslovima i da se moraju primeniti instrumenti koji su fleksibilniji od strogo matematičkih tehnika vezanih za čistu optimizaciju. Za takve zadatke razvijene su specijalne tehnike analize i rešavanja među kojima su najznačajnije PROMETHEE (*Brans et al, 1986*), ELECTRE (*Roy, 1968*), AHP (*Saaty, 1980*), TOPSIS (*Hwang and Yoon, 1981*) i CP (*Zeleny, 1982*). Navedene tehnike spadaju u kategoriju metoda meke optimizacije pošto, pored matematičkih struktura i instrumenata, koriste heurističke parametre, mere rastojanja, skale vrednosti itd.

Svaki od navedenih metoda ima po nekoliko verzija (npr. PROMETHEE 1 i 2), svi imaju i prednosti i nedostatke, a primene u različitim oblastima ukazuju da

metodi sve više postaju nezamenljivi kao podrška odgovornom odlučivanju. U novije vreme paralelno se koriste standardne i fuzzy verzije metoda da bi se obuhvatio kompleks problema povezanih sa ljudskom subjektivnošću, ekspertskim znanjem, sklonošću da se koriste verbalne umesto brojčanih ocena i dr. (Triantaphyllou and Lin, 1996; Bender and Simonovic, 2000; Deng, 1999; Srđević and Medeiros, 2002). Korak dalje je koncept grupnog odlučivanja, takođe u standardnom i fuzzy okruženju. Konačno, za PROMETHEE, ELECTRE i AHP postoje komercijalne i edukativne verzije softvera, a kompetitivnost metoda je u određenoj meri odraz stanja na tržištu softvera.

U radu su prikazane metodološke i matematičke karakteristike standardnih (ne-fuzzy) metoda TOPSIS, PROMETHEE 2, CP i AHP. Predložen je način njihovog poređenja i sinteze rezultata, a zatim je dat primer primene na problem vrednovanja namena akumulacije u odnosu na zadati skup ekonomskih kriterijuma. Dobijeni rezultati vrednovanja po više metoda i postupak sinteze rezultata pokazuju kako se višekriterijumskom analizom mogu dobiti merodavne ocene o namenama akumulacije i iste meriti na jedinstvenoj skali vrednosti. Iako su korišćeni samo ilustrativni podaci i ocene o kriterijumima i namenama fiktivne akumulacije, primer je inspirisan Đerdapskom akumulacijom uzvodno od Kladova i njenim ekonomskim značajem za Srbiju.

2. VIŠEKRI TERIJUMSKI METODI TOPSIS, PROMETHEE 2, CP I AHP

Familija metoda za višekriterijumsku optimizaciju je brojna i može se deliti prema različitim kriterijumima. Dve podele su najčešće: prva - na metode striktno i meke optimizacije i druga - na standardne i fuzzy metode. Svaka kategorija i podkategorija u ovoj familiji ima svoje sledbenike i oponente, diskusije su kontroverzne, a konačnih zaključaka o prednostima i nedostacima pojedinih metoda nema. U fokusu pažnje su, pre svega, metodi kod kojih su dobro izbalansirana dva osnovna svojstva: teorijsko-metodološka konzistentnost i praktičnost u korišćenju. Naročito se insistira na upotrebljivosti metoda u praktičnom donošenju odluka kada su podaci za donošenje odluka mešovite strukture (kvantitativni i kvalitativni) i različite metrike.

Ovde je pažnja usmerena na metode meke optimizacije poznate pod nazivima TOPSIS, PROMETHEE 2, CP

(Kompromisno programiranje) i AHP (Analitički hijerarhijski proces). Iako se metodi koriste i u fuzzy verzijama (npr. Triantaphyllou and Lin, 1996; Deng 1999; Srđević and Medeiros, 2002), iz metodoloških razloga izložene su karakteristike samo standardnih verzija korišćenih u vrednovanju i rangiranju namena akumulacije.

Zajedničko za sve višekriterijumske metode je što se u određenoj etapi formira matrica performanse R . Svaki red takve matrice odgovara jednoj alternativni, a svaka kolona jednom kriterijumu. Element matrice predstavlja performansu (rejtng) alternative u odnosu na kriterijum. Za m kriterijuma (C_1, C_2, \dots, C_m) i n alternativa (A_1, A_2, \dots, A_n), matrica R ima oblik (1), a vrednosti (w_1, w_2, \dots, w_m) upisane iznad matrice predstavljaju težinske vrednosti kriterijuma definisane od strane donosioca odluka, ili određene na drugi način; zbir ovih težinskih vrednosti je 1.

$$R = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_m \\ w_1 & w_2 & \dots & w_m \\ A_1 & r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ A_2 & r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_n & r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{matrix} \quad (1)$$

TOPSIS, PROMETHEE 2 i CP direktno analiziraju i vrednuju matricu (1). AHP ovu matricu kreira i analizira na poseban način. Drugim rečima, matrica (1) je startna tačka za TOPSIS, PROMETHEE 2 i CP, a za AHP nije.

2.1 TOPSIS

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) rangira alternative prema udaljenosti od tzv. idealnog rešenja i idealnog negativnog rešenja. Metod je predložen kao alternativa za metod ELECTRE i uživa značajnu popularnost u oblasti višekriterijumske optimizacije. Osnovna logika metoda je da se prvo definišu idealno rešenje i idealno negativno rešenje. Idealno rešenje minimizira kriterijume cene, a maksimizira kriterijume dobiti; za minimalno idealno rešenje važi obrnuto. Optimalna alternativa je ona koja je najbliža idealnom rešenju, odnosno najdalja od idealnog negativnog rešenja. Udaljenosti se tretiraju kao geometrijske (Euklidske). Rangiranjem alternativa prema relativnoj sličnosti sa

idealnim rešenjem izbegava se situacija da alternativa istovremeno ima istu sličnost sa idealnim i sa negativnim idealnim rešenjem.

Idealno rešenje se definiše pomoću najboljih rejting vrednosti alternativa za svaki pojedinačni kriterijum; obrnuto, negativno idealno rešenje predstavljaju najgore vrednosti rejtinga alternativa. Pojmovi najbolji i najgori interpretiraju se za svaki kriterijum posebno, prema tome da li je u pitanju maksimizacija ili minimizacija.

TOPSIS se sastoji iz 6 koraka:

1. Normalizovanje matrice performanse

U matrici $R=(r_{ij})$, rel.(1), brojne vrednosti ocena alternativa u opštem slučaju imaju različitu metriku. Kada se radi o vodoprivrednom kontekstu, za različite kriterijume vrednovanje alternative može biti u novčanim jedinicama, prema prioritetima, prema stepenu obezbeđenosti garantovane vode, ili prema površini branjenoj od poplava. Drugim rečima, ako je kriterijum ekonomska dobit, rejting alternative može se izraziti u novčanim jedinicama, drugi kriterijum može biti subjektivna ocena na skali vrednosti od 1-10, treći kriterijum može biti investiciona cena alternative (objekta) itd. Normalizacijom elemenata matrice (1) prema relaciji (2), dobija se matrica (3). Cilj normalizacije je da svi elementi nove matrice $X=(x_{ij})$ budu bezdimenzionane veličine. Treba napomenuti da se normalizovana matrica X u više metoda koristi kao startna matrica performanse umesto rejting-matrice R .

$$x_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n r_{ij}^2}} \quad (2)$$

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_m \\ w_1 & w_2 & \dots & w_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

2. Množenje normalizovane matrice performansi težinskim koeficijentima kriterijuma

Putem relacije (4) TOPSIS definiše težinsku normalizovanu matricu performansi kao $V=(v_{ij})$, gde je svako v_{ij} proizvod normalizovane performanse alternative i odgovarajućeg težinskog koeficijenta kriterijuma.

$$V = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} w_1 x_{11} & w_2 x_{12} & \dots & w_m x_{1m} \\ w_1 x_{21} & w_2 x_{22} & \dots & w_m x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1 x_{n1} & w_2 x_{n2} & \dots & w_m x_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

3. Određivanje idealnih rešenja

Idealno rešenje (A^*) i negativno idealno rešenje (A^-) određuju se pomoću relacija (5) i (6).

$$A^* = \{(max V_{ij} | j \in J), (min V_{ij}, j \in J'), i=1, \dots, n\} \\ = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*\} \quad (5)$$

$$A^- = \{(min V_{ij} | j \in J), (max V_{ij}, j \in J'), i=1, \dots, n\} \\ = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_m^-\} \quad (6)$$

gde su:

$$J = \{j=1, 2, \dots, m | j \text{ pripada kriterijumima koji se maksimiziraju}\}$$

$$J' = \{j=1, 2, \dots, m | j \text{ pripada kriterijumima koji se minimiziraju}\}$$

Za donosioca odluka su najbolje one alternative koje imaju najveće v_{ij} u odnosu na kriterijume koji se maksimiziraju i najmanje v_{ij} u odnosu na kriterijume koji se minimiziraju. Očigledno je da A^* ukazuje na najbolju alternativu - idealno rešenje; po istoj logici A^- ukazuje na idealno negativno rešenje.

4. Određivanje rastojanja alternativa od idealnih rešenja

U ovom koraku se pomoću relacija (7) i (8) izračunavaju n -dimenziona Euklidska rastojanja svih alternativa od idealnog i idealnog negativnog rešenja.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^*)^2}, i = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, \dots, n \quad (8)$$

5. Određivanje relativne blizine alternativa idealnom rešenju

Za svaku alternativu određuje se relativno odstojanje prema relaciji (9)

$$Q_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-}, i = 1, \dots, n \quad (9)$$

gde je $0 \leq Q_i^* \leq 1$. Alternativa A_i je bliža idealnom rešenju ako je Q_i^* bliže vrednosti 1, ili što je isto, ako je S_i^* bliže vrednosti 0.

6. Rangiranje alternativa

Alternative se rangiraju po opadajućim vrednostima relativnih odstojanja Q_i^* .

2.2. PROMETHEE 2

Metod PROMETHEE 2 (Preference Ranking Organisation Method of Enrichment Evaluation) se zasniva na korišćenju kombinacije 6 tipičnih funkcija preferenci (Brans et al, 1986). Za poređenje alternativa a i b u odnosu na bilo koji kriterijum koristi se funkcija $P(a,b)$ koja definiše intenzitet razlike između alternativa a i b . Vrednost funkcije se kreće u intervalu 0-1 u zavisnosti od intenziteta $d = a - b$. Što je veće d , veća je dominacija a u odnosu na b . Granične vrednosti 0 i 1 odgovaraju slučajevima kada nema razlike između a i b , odnosno kada je ta razlika veoma velika i postoji potpuna dominacija a nad b ; međuslučajevi koji su bliski graničnim vrednostima su slaba i jaka preferentnost.

Osnov metoda čini funkcija preference

$$H(d) = \begin{cases} P(a,b) & d \geq 0 \\ P(b,a) & d < 0 \end{cases} \quad (10)$$

koja uzima jedan od mogućih oblika prikazanih u Tabeli 1.

Tipovi kriterijumskih funkcija su: I - običan kriterijum, II - kvazi kriterijum, III - linearni kriterijum, IV - nivo kriterijum, V - linearni kriterijum sa zonom indiferentnosti i VI - Gausov kriterijum. Granične vrednosti indiferentnosti i preference za neke od ovih funkcija kontrolišu se parametrima q i p .

Postupak vrednovanja alternativa po ovom metodu sastoji se u određivanju indeksa višekriterijumske preference. To je srednja vrednost preferentnih funkcija $H_j(d)$, prethodno pomnoženih težinskim koeficijentima kriterijuma, koja se sračunava za svaku alternativu. Rangiranje alternativa vrši se prema opadajućim vrednostima ovih indeksa.

U upotrebi su dve verzije metoda. PROMETHEE 1 vrši parcijalno vrednovanje pozitivnih i negativnih odstupanja funkcija H na skupu kriterijuma za svaku alternativu. PROMETHEE 2 sprovodi potpuno vrednovanje u kome se analiziraju neto (pozitivna minus negativna) odstupanja funkcija preferenci. U radu se koristi samo verzija metoda 2.

2.3. CP

Kompromisno programiranje (CP - Compromise Programming) je tehnika koja rangira alternative prema njihovoj bliskosti 'idealnim' vrednostima kriterijuma. Minimizacija bliskosti sa idealnim vrednostima je surogat postupka standardne maksimizacije ciljne funkcije.

CP definiše kao najbolju onu alternativu koja ima najmanje raštojanje od idealnog rešenja u skupu mogućih rešenja (Zeleny, 1982). Mera rastojanja je familija L_p -metrika data kao

$$L_p(i) = \left[\sum_{j=1}^m w_j^p \left| \frac{r_j^* - r_{ij}}{r_j^* - r_j^{**}} \right|^p \right]^{1/p} \quad (11)$$

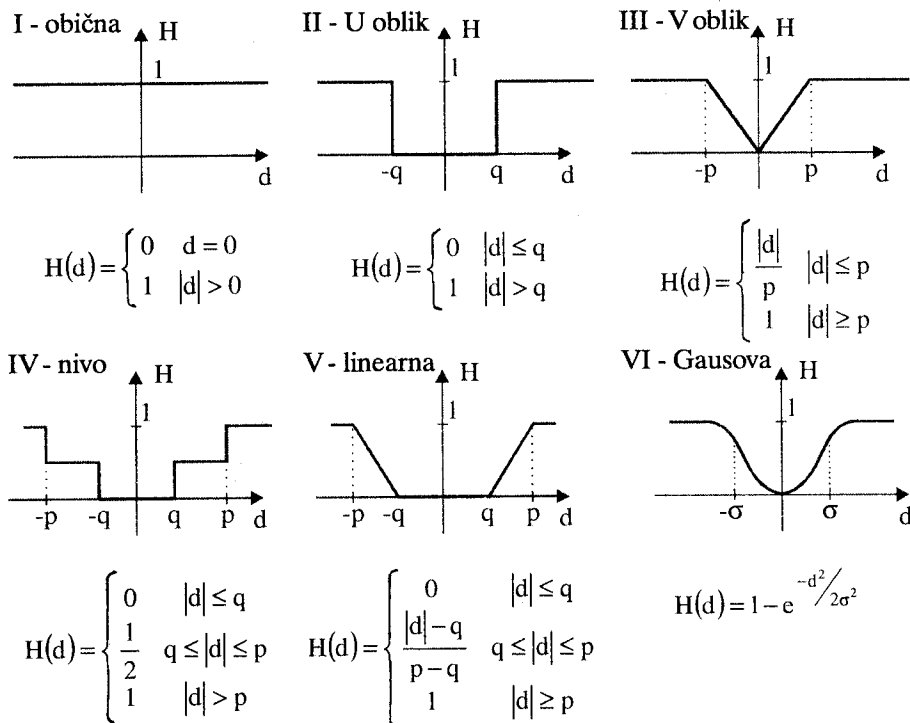
gde je $L_p(i)$ oznaka za L_p -metriku alternative A_i , r_{ij} je rejting alternative A_i u odnosu na kriterijum C_j , r_j^* i r_j^{**} su najbolja i najgora vrednost rejtinga na skupu alternativa za kriterijum C_j i p je parametar koji ukazuje na sklonost donosioca odluka u vrednovanju.

Alternativa sa minimalnom L_p metrikom smatra se najboljom, a rangiranje se vrši prema rastućoj L_p metrici.

Težinski koeficijenti kriterijuma w_j ($j=1, 2, \dots, m$) su normirane vrednosti originalnih ocena koje definiše

donosilac odluka, a parametar p posredno iskazuje njegove preference u balansiraju kriterijuma ($p=1$), uobičajnom korišćenju efekta kvadriranja greške ($p=2$), ili traženju apsolutno dominantnog rešenja ($p=\infty$). Drugim rečima, ako se dopušta međusobno kompenziranje kriterijuma, p mora biti 1; ako se smanjuje marginalna vrednost ciljne funkcije, p mora biti veće od 1, a kada je važna samo apsolutno najbolja alternativa, p mora biti beskonačno (min-max kriterijum Čebiševa). U svakom od navedenih slučajeva, ciljna funkcija optimizacionog problema se transformiše u različit oblik.

Tabela 1: Tipovi kriterijuma u metodu PROMETHEE 2



2.4. AHP

AHP (*Saaty 1980*) je metod koji zahteva da se problem odlučivanja definiše kao hijerarhija: na vrhu je cilj, ispod su kriterijumi i na dnu su alternative. Ako se bar jedan od kriterijuma dekomponuje na podkriterijume, formira se novi hijerarhijski nivo ispod nivoa kriterijuma, a iznad nivoa alternativa; ovaj slučaj ne utiče na opštost izlaganja i neće se dalje razmatrati. Alternative se prema cilju filtriraju međusobnim poređenjem u parovima u odnosu na prethodno

rangirane kriterijume. Krajnji rezultat su vektori relativnih značaja kriterijuma i alternativa u odnosu na cilj. Kao i drugi metodi, AHP neposredno pre konačne sinteze rezultata generiše matricu performanse u kojoj se nalaze težinski elementi alternativa u odnosu na svaki pojedinačni kriterijum. Matematički osnovi AHP detaljnije su prikazani u (*Jandrić i Srđević, 2000*).

Poređenje elemenata u parovima na svakom nivou hijerarhije u odnosu na element u višem nivou vrši se pomoću Satijeve skale, Tabela 2. Brojne vrednosti u

rasponu 1/9 - 9 unose se u matricu A tako da važi $a_{ji}=1/a_{ij}$; elementi na glavnoj dijagonali jednaki su 1.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Tabela 2: Satijeva skala

$$S = \left\{ \frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 \right\}$$

S	Definicija
1	Isti značaj
3	Slaba dominantnost
5	Jaka dominantnost
7	Vrlo jaka dominantnost
9	Apsolutna dominantnost
2,4,6,8	Međuvrednosti

Ako se usvoji da vektor $w=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ sadrži težinske koeficijente vrednovanih elemenata, zadatak je da se njihove vrednosti odrede tako da matrica (12) bude što približnija matrici (13).

$$X = \begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ w_3/w_1 & w_3/w_2 & \dots & w_3/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Postoje razni metodi da se iz matrice (13) ekstrahuje vektor w . U standardnoj verziji AHP, za matricu (12) se određuje njena maksimalna sopstvena vrednost λ_{\max} , a vektor sopstvenih vrednosti se usvaja kao traženi vektor težinskih koeficijenata. Naime, pošto važi:

$$\begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ w_3/w_1 & w_3/w_2 & \dots & w_3/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

traženi vektor $w=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ se dobija rešavanjem linearnog sistema jednačina (15).

$$Aw = nw, \text{ ili } (A-nI)w = 0 \quad (15)$$

Sistem (15) ima netrivialno rešenje ako i samo ako je n sopstvena vrednost matrice A , tj. ako je determinanta matrice $(A-nI)$ jednaka nuli. Pošto je prema teoremi Perron-Frobenius-a rešenje jedinstveno u granicama date multiplikativne konstante, da bi se postiglo da rešenje w bude jedinstveno, njegovi elementi se moraju normalizovati nekim od poznatih metoda..

Metod za određivanje vektora težinskih koeficijenata korišćen u ovom radu spada u grupu aditivnih. Elementi date kolone matrice (12) se sabere, a zatim izvrši njihova normalizacija tako što se svaki element kolone podeli dobijenom sumom. Postupak se ponavlja za svaku kolonu, a zatim se nalazi srednja vrednost normalizovanih vrednosti po svim vrstama. Matematički model ovog postupka čine relacije (16) i (17), a dobijene vrednosti predstavljaju traženi vektor w ; lako se proverava da je zbir njegovih elemenata 1.

$$a_{ij} = a_{ij} \left[\sum_{i=1}^n a_{ij} \right]^{-1}, i, j=1, \dots, n \quad (16)$$

$$w_i = (1/n) \sum_{j=1}^n a_{ij} = (1/n) \sum_{j=1}^n a_{ij} \left[\sum_{i=1}^n a_{ij} \right]^{-1}, i=1, \dots, n \quad (17)$$

Pored aditivnog, u standardnim primenama AHP koristi se i metod geometrijskih sredina. Tada se vektor težinskih koeficijenata određuje normalizovanjem geometrijskih sredina redova matrice. Relacije (18) i (19) opisuju ovaj slučaj.

$$w_i = \left[\prod_{j=1}^n a_{ij} \right]^{1/n}, i=1, \dots, n \quad (18)$$

$$w_i = w_i \left\{ \sum_{i=1}^n w_i \right\}^{-1} = \left[\prod_{j=1}^n a_{ij} \right]^{1/n} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\prod_{j=1}^n a_{ij} \right]^{1/n} \right\}^{-1}, i=1, \dots, n \quad (19)$$

Vektor težinskih koeficijenata (17), ili (19), najpre se određuje za sve kriterijume nakon što je izvršeno njihovo poređenje u parovima u odnosu na cilj. Zatim se sve alternative porede u parovima u odnosu na dati kriterijum i određuju parcijalni težinski koeficijenti; ovi koeficijenti će u fazi sinteze biti pomnoženi sa težinskim koeficijentom kriterijuma koji je korišćen pri poređenju. Procedura se ponavlja za svaki kriterijum i dobija se onoliko vektora parcijalnih težinskih koeficijenata alternativa koliko ima kriterijuma. Sinteza se sastoji u sabiranju proizvoda parcijalnih težinskih koeficijenata alternativa i pripadajućih kriterijuma. Konačni rezultat su težinski koeficijenti alternativa čiji

je zbir 1. Najveći težinski koeficijent ima najbolja alternativa, a najmanji - najgora.

U direktnoj verziji AHP ne vrše se poređenja kriterijuma i alternativa u parovima, odnosno eliminiše se upotreba Satijeve skale. Vrednosti kriterijuma i alternativa unose se direktno onako kako se to čini u drugim metodima kada se kreira matrica performansi alternativa u odnosu na kriterijume. Umesto poređenja u parovima, unete vrednosti se u parovima međusobno dele čime se direktno formira matrica A data relacijom (12). Dalji postupak je isti kao u standardnoj verziji AHP.

3. O POREĐENJU RANGOVA

3.1. KONFLIKT RANGOVA

Konačni rezultat rangiranja su rangovi, a različiti višekriterijumski metodi uglavnom daju različita rangiranja. Razlike rangova izvedenih po različitim metodima tretiraju se u mnogim radovima (npr. *Salminen et al, 1998; Raju and Pillai, 1999; Zuffo et al, 2002*). Kada se govori o konfliktu rangova (*Ray and Triantaphyllou, 1999*), najčešće se radi o razlikama metoda po kojima su rangovi dobijeni. Zbog toga autori uglavnom izbegavaju favorizovanje bilo kog metoda i radije analiziraju razloge različitog rangiranja. Prema (*Salminen et al, 1998*) najbolje je koristiti nekoliko metoda, identifikovati najbolje rangirane alternative, donosiocu odluka predočiti razloge odstupanja među rangovima i konačnu odluku o tome koji će metod i rangovi biti usvojeni prepuštiti donosiocu odluka.

Pošto u realnim poslovima donošenja odluka nije moguće govoriti o a priori najboljoj rang listi alternativa, ovde se predlaže racionalan prilaz da se lista dobijena po jednom metodu usvoji kao referentna, da se rezultati ostalih metoda uporede sa referentnom listom i izvrši sinteza takve analize. U delu rada posvećenom primeru izvršena je sinteza te vrste.

3.2. SPIRMANOV KOEFICIJENT KORELACIJE RANGOVA

Glavni problem u analizi konflikta rangova je mala veličina uzorka koja limitira upotrebu statističkih tehnika. Jedna od malog broja mogućnosti je korišćenje Spirmanovog koeficijenta (*Gibbons, 1971*) kojim se i na manjem uzorku iskazuje stepen korelacije rangova. Ovaj koeficijent definiše meru sličnosti rangiranja po

različitim metodima. Ako su U_a i V_a rangovi dobijeni za alternativu a po dva različita metoda, Spirmanov koeficijent je dat relacijom (20).

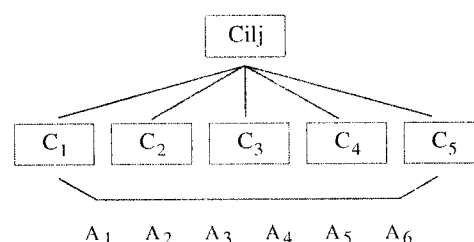
$$R = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_a^2}{n(n^2 - 1)} \quad (20)$$

D_a je razlika U_a i V_a , a n je broj alternativa. Vrednost Spirmanovog koeficijenta može da varira između teorijskih vrednosti -1 i 1. Kada se vrednost približava 1, indikacija je da su rangovi slični ili isti; kada je vrednost manja od nule i približava se -1, rangovi su obrnuti, odnosno negativno korelisani.

4. PRIMER - RANGIRANJE ALTERNATIVA KORIŠĆENJA AKUMULACIJE

4.1. POSTAVKA PROBLEMA

Razmatra se problem kao u radu (*Srđević i dr., 2000*). Treba ekonomski vrednovati skup mogućih namena akumulacije u odnosu na zadate kriterijume, pri čemu se i kriterijumi prethodno vrednuju u odnosu na globalni cilj definisan kao 'najekonomičnije korišćenje akumulacije', Slika 1.



Slika 1. Hijerarhijska struktura problema

Moguće namene se tretiraju kao alternative A1-A6, a kriterijumi za vrednovanje namena su C1-C5.

Alternative

- A1: Proizvodnja električne energije
- A2: Navodnjavanje
- A3: Odbrana od poplava
- A4: Snabdevanje vodom
- A5: Turizam i rekreacija
- A6: Rečni saobraćaj

Kriterijumi

- C1: Povećanje nacionalnog dohotka
- C2: Povećanje priliva novca iz inostranstva
- C3: Uravnoteženje režima plaćanja
- C4: Supstitucija uvoza
- C5: Porast regionalnog dohotka

4.2. VREDNOVANJE KRITERIJUMA I ALTERNATIVA

Kriterijumi odražavaju globalne i regionalne preference u pogledu korišćenja akumulacije. Na primer, država (republika) ima interes da se korišćenjem akumulacije za svaku pojedinačnu namenu inkrementalno poveća nacionalni dohodak po stanovniku za određeni iznos (C1). Interes regiona (C5) je u suštini isti, ali se odnosi prvenstveno na stanovnike regiona; metrika je ista, ali je skala vrednosti različita.

Odabrani kriterijumi imaju različitu metriku ili skale vrednosti i svi se maksimiziraju. Na primer, porast nacionalnog dohotka, povećanje priliva iz inostranstva i porast regionalnog dohotka mere se u US\$, dok se uravnoteženje režima plaćanja meri verbalno, kao

'neznatno', 'značajno', 'veoma značajno' i sl. Svaka alternativa dobija numeričku ili lingvističku ocenu u odnosu na dati kriterijum. Korišćenjem odgovarajućih vrednosnih skala za kriterijume, ocene alternativa se kodiraju kao numeričke vrednosti i dovode na ulaz svakog od korišćenih metoda. Vrednosti date u Tabeli 3 predstavljaju primer ocenjivanja alternativa na osnovu uvedenih vrednosnih skala.

Pretpostavljeno je da za donosioca odluka kriterijumi nemaju jednak značaj. Razlike u značaju se mogu iskazati na razne načine, a ovde je svaki kriterijum vrednovan ocenom 1-10, u rasponu subjektivnih ocena 1 - malo važan, do 10 - najvažniji. Za usvojene ocene 10, 8, 1, 5 i 4 za kriterijume C1-C5, posle normiranja dobijene su težinske vrednosti prikazane u Tabeli 3. Zbir težinskih koeficijenata w_1, \dots, w_5 jednak je 1.

Alternative su vrednovane nakon što su novčane i lingvističke ocene kodirane i skalirane za svaki kriterijum posebno. Za kriterijume C1 i C5 skaliranje intervala rasta bruto nacionalnog dohotka po stanovniku izvršeno je dodeljivanjem inkrementalnih dekadnih ocena 10 do 50.

Tabela 3: Matrica vrednosti alternativa u odnosu na kriterijume

Alternative	Kriterijumi				
	C1 $w_1=0.36$	C2 $w_2=0.29$	C3 $w_3=0.04$	C4 $w_4=0.18$	C5 $w_5=0.14$
A1	40	3	5	5	20
A2	20	1	2	3	30
A3	30	1	1	1	30
A4	10	1	2	2	50
A5	20	2	2	2	30
A6	10	2	2	3	20

Kriterijum 2 kodiran je ocenama 1 do 3, a kriterijumi C3 i C4 ocenama 1-5. Lingvističke ocene alternativa u odnosu na ciljeve C2, C3 i C4 međusobno se razlikuju.

C1: 50-(povećanje BNP > 500 \$); 40-(povećanje 400-500 \$); 30-(povećanje 300-400 \$); 20-(povećanje 200-300 \$); 10-(povećanje < 200 \$).

C2: 3-veliki; 2-srednji; 1-mali.

C3: 5-vrlo značajno; 4- značajno; 3- srednje; 2-malo; 1-vrlo malo.

C4: 5-velika; 4- znatno povećana; 3- srednja; 2- mala; 1-beznačajna.

C5: 50-(povećanje BNP > 1.000 \$); 40-(povećanje 800-1.000 \$); 30-(povećanje 600-800 \$); 20-(povećanje 300-600 \$); 10-(povećanje < 300 \$).

4.3. REZULTATI I ANALIZA

Rezultati vrednovanja alternativa metodima TOPSIS, PROMETHEE 2, CP ($p=1$, $p=2$ i $p=\infty$) i AHP (standardno i direktno) prikazani su u Tabeli 4. Za PROMETHEE 2 korišćene su funkcije preferenci tipa 1 (indiferentnost u odnosu na distancu bilo koje dve alternative u odnosu na isti, bilo koji kriterijum).

Svi metodi identifikuju alternativu 1 kao najbolju. Alternativa 5 je kod svih metoda na drugom ili trećem mestu, a alternativa 4 je na poslednjem ili preposlednjem mestu. AHP kao drugu najbolju

identifikuje alternativu 3, dok metodi TOPSIS, PROMETHEE 2 i CP ($p=2$) ovu alternativu rangiraju kao poslednju.

Tabela 4: Rangovi alternativa po različitim metodima

Alternative	Metodi							
	TOPSIS	PROMETHEE 2	CP			AHP		
			$p=1$	$p=2$	$p=\infty$	standardni	direktni	
A1	1	1	1	1	1	1	1	
A2	4	3	4	4	3	5	4	
A3	6	4	3	6	3	2	3	
A4	5	6	6	5	3	6	6	
A5	3	2	2	3	2	3	2	
A6	2	5	5	2	2	4	5	

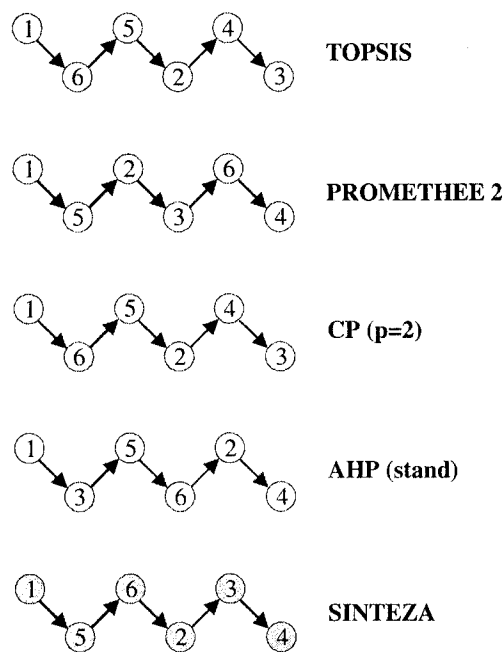
Rezultati rangiranja mogu se iskoristiti za dobijanje sintetičke ocene o redosledu alternativa. Opravdano je uzeti u obzir rangove za reprezentativni skup metoda: TOPSIS, PROMETHEE 2, CP ($p=2$) i standardni AHP, dakle izostavljajući metrike $p=1$ i $p=\infty$ za metod CP i verziju direktnog vrednovanja u AHP. U metodu CP metrika $p=1$ unosi linearne kompenzacije kriterijuma, a metrika $p=\infty$ je specijalan slučaj kompresije rangova na raspon od 1 do 3. Kod direktnog vrednovanja u AHP eliminiše se Satijeva skala i odstupa se od standardne verzije metoda.

Ako se za referentna četiri metoda saberu dobijeni rangovi i alternative poređaju prema rastućim zbirovima, konačni redosled je: A1, A5, A6, A2, A3, A4, Slika 2. Uočava se da ovaj redosled nije dobijen ni po jednom metodu.

Rezultati pokazuju da po svim metodima apsolutno dominirajući rang 1 ima namena akumulacije za proizvodnju elektrine energije (A1), da je na drugom mestu turizam i rekreacija (A5), na trećem rečni saobraćaj (A6) i na poslednjem vodosnabdevanje (A4). Ovaj rezultat verovatno nije daleko od istine o prioritetima namena Đerdapske akumulacije sa stanovišta simuliranog donosioca odluka - državne institucije zadužene za strateški menadžment vodama Dunava.

Iz Tabele 5 vidi se da Spirmanov koeficijent za sve metode varira od 0.37 do 1, što ukazuje na pozitivnu korelaciju. Potpuna korelacija ($R=1$) postoji između TOPSIS i CP ($p=2$), kao i između AHP (direktni) i CP ($p=1$). Između PROMETHEE 2 i CP ($p=1$) je visoka pozitivna korelacija ($R=0.94$), kao i između

PROMETHEE 2 i direktne verzije AHP. Visoka korelacija ($R=0.89$) je između CP ($p=1$) i standardne verzije AHP, kao i između obe verzije AHP.



Slika 2. Izračunati i sintetički rangovi

PROMETHEE 2 je dobro korelisan i sa standardnim AHP ($R=0.71$). Najniža korelacija je između CP ($p=2$) i standardne verzije AHP. Pošto je Spirmanov koeficijent visok za najveći broj parova metoda, zaključak je da je proces vrednovanja bio konzistentan i da konačni rangovi alternativa ne odstupaju bitno od metoda do metoda.

Tabela 5: Vrednosti Spirmanovog koeficijenta korelacije rangova

Metod	TOPSIS	PROMETHEE 2	CP		AHP	
			$p=1$	$p=2$	standardni	direktni
TOPSIS	1.00	0.54	0.43	1.00	0.37	0.43
PROMETHEE 2		1.00	0.94	0.54	0.71	0.94
CP ($p=1$)			1.00	0.43	0.89	1.00
CP ($p=2$)				1.00	0.37	0.43
AHP (s)					1.00	0.89
AHP (d)						1.00

5. ZAKLJUČAK

U poslovima odgovornog odlučivanja uobičajeno je korišćenje specijalnih metoda za višekriterijumsku analizu i indirektnu optimizaciju. Metodima tzv. meke optimizacije najpre se opisuje kompleks višestrukih ciljeva od kojih se neki maksimiziraju a neki minimiziraju, modeliraju konflikti prioriteta različitih učesnika u procesu donošenja odluka, opisuju različite metrike prostora kriterijuma i alternativnih rešenja, a zatim se traži rešenje najbliže idealnoj tački, najboljem kompromisu i sl. Metodi kojima se modeliraju subjektivizam, aproksimativno rezonovanje i ekspertsko znanje donosioca odluka, kao i razni oblici heuristike, samo su deo relativno novog ambijenta koji je doneo i novu terminologiju i na određen način novu primenu matematike i teorije optimizacije u realnim poslovima planiranja i gazdovanja resursima.

Višekriterijumski metodi se, međutim, ne koriste dovoljno u našoj vodoprivrednoj praksi, naročito u oblasti planiranja i menadžmenta vodnim resursima gde im je pravo mesto. Da bi se ukazalo na taj problem i podstakao preokret u potrebnom pravcu, u ovom radu je prikazana primena četiri poznata metoda u rešavanju višekriterijumskog problema rangiranja namena jedne akumulacije. Usvajene vrednosne skale i sprovedeni postupak rangiranja služe kao ilustracija mogućeg uporednog tretiranja istog problema u različitim metodološkim okruženjima. Rezultati pokazuju da je dobro koristiti nekoliko metoda za donošenje odluka i da se sintezom rangova alternativa dobijenih po različitim metodima mogu identifikovati najbolje, ili bar dominantne alternative.

LITERATURA

- [1] Bender M.J., Simonovic S.P.: A fuzzy compromise approach to water resources systems planning under uncertainty, *Fuzzy Sets and Systems* 115 (2000) 35-44, 2000.
- [2] Brans J.P., Vincke Ph., Mareschal B.: How to select and how to rank projects by the PROMETHEE method, *European Journal of Operational Research* 24 (1986) 228-238, 1986.
- [3] Deng H.: Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison, *International Journal of Approximate Reasoning* 21 (1999) 215-231, 1999.
- [4] Gibbons J.D.: *Nonparametric statistical inference*, McGraw-Hill, New York, 1971.
- [5] Hwang C.L., Yoon K.S.: *Multiple attribute decision making: methods and applications*, Springer, Berlin, 1981.
- [6] Jandrić Z., Srđević B.: Analitički hijerarhijski proces kao podrška odlučivanju u vodoprivredi, *Vodoprivreda* 0350-0519, 32 (2000) 186-188, p. 327-334, 2000.
- [7] Raju K.S., Pillai C.R.S.: Multicriterion decision making in river basin planning and development, *European Journal of Operational Research* 112 (1999), 249-257, 1999.
- [8] Ray T., Triantaphyllou E. Procedures for the evaluation of conflicts in rankings of alternatives, *Computers and Industrial Engineering*, 36(1), 35-44, 1999.
- [9] Roy B.: Classement et choix en presence de points devue multiples (la methode ELECTRE), *Revue d Informatique et de recherche operationelle*, 6(8) 57-75, 1968.
- [10] Saaty T.L.: *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York, 1980.
- [11] Srđević B., Jandrić Z. i Potkonjak S.: Vrednovanje alternativa korišćenja akumulacije pomoću analitičkog hijerarhijskog procesa, *Vodoprivreda* 0350-0519, 32 (2000) 183-185, p. 237-242, 2000.

- [12] Srđević B. and Medeiros Y.D.P.: Fuzzy AHP assessment of water management plans, submitted for European Journal of Operations Research, 2002.
- [13] Triantaphyllou E., Lin C.T.: Development and evaluation of five multiattribute decision making methods, International Journal of Approximate Reasoning 14 (1996) 281-310, 1996.
- [14] Zeleny, M: Multiple criteria decision making, McGraw-Hill Book Company, New York, 1982.
- [15] Zuffo A.C., Reis L.F.R., Santos R.F. and Chaudhry F.H., Aplicacao de metodos multicriterios ao planejamento de recursos hidricos, Revista Brasileira de Recursos Hidricos, 7(1), 81-102, 2002.

EVALUATION OF STORAGE RESERVOIR PURPOSES BY MEANS OF MULTICRITERIA OPTIMIZATION MODELS

by

Prof. Bojan SRDJEVIC, Ph.D.
Faculty of Agriculture, Novi Sad

Summary

The four multicriteria optimization methods applied for the evaluation and ranking of the reservoir purposes - TOPSIS, PROMETHEE 2, CP and AHP - are frequently used in modern decision analysis. The global economical goal was defined as the most profitable use of the storage reservoir. Altogether six purposes were considered as the decision alternatives, i.e. electric power generation; irrigation; flood protection; water supply; tourism and recreation; and river traffic (navigation). The alternatives were evaluated with respect to five prescribed economical criteria of different metrics: gain in national income; earning

foreign exchange; improvement of the balance of payment; import substitution (self-sufficiency); and gain in regional income. An example is provided to show that the different methods could produce different rankings of alternatives, but that they almost uniquely identify the best and the worst ones. The paper ends with a synthesis of results, aimed at an unambiguous ranking, with a statistical assessment of the compatibility of the methods for practical applications.

Key words: reservoir purpose, multicriteria optimization, TOPSIS, PROMETHEE 2, CP, AHP.

Redigovano 03.09.2002.