

Primer metodologije za izbor perspektivnih lokacija za izgradnju reverzibilnih hidroelektrana

Tina Dašić*, Ljubodrag Savić*, Miloš Stanić*, Andrijana Todorović*, Marija Milić**, Milan Tumara**

* Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet

** Energoprojekt - Hidroinženjering

Rezime - Porast udela intermitentnih izvora energije (posebno solarnih i vetroelektrana), nameće potrebu za efikasnim skladištenjem energije radi stabilizacije elektroenergetskog sistema. Najznačajniji kapaciteti za tu namenu su reverzibilne hidroelektrane (RHE). U radu je predstavljena nova metodologija za identifikaciju perspektivnih lokacija RHE i pumpno akumulacionih postrojenja pri postojećim hidroelektranama (PAP) - SMART-PSH (Site Mapping And Ranking Technique for Pumped Storage Hydropower plants). Metodologija se zasniva na kombinaciji automatizovanog pretraživanja prostora korišćenjem GIS alata, ekspertске analize lokacija i višekriterijumskog rangiranja potencijalnih sistema. Za izbor perspektivnih RHE i PAP koriste se prostorni odnosi (denivelacija i rastojanje) između akumulacija, hidrološke karakteristike vodotoka i morfološke karakteristike akumulacionih prostora. Pored ovih parametara, značajan uticaj na ocenu kvaliteta tih sistema imaju geološke karakteristike sredine, potencijalni uticaji na životnu sredinu, stanovništvo, kulturno-istorijsko nasleđe, infrastrukturu i privredu, kao i blizina saobraćajne i prenosne elektroenergetske mreže i drugi faktori. Rangiranje potencijalnih RHE i PAP vrši se na osnovu velikog broja kriterijuma sa različitim nivoima značajnosti (težinskim koeficijentima).

Cljučne reči - reverzibilne hidroelektrane, GIS alati, prostorne analize, hidrološke analize, višekriterijumsko rangiranje

1 UVOD

Poslednjih decenija, a posebno od potpisivanja Pariskog sporazuma o klimatskim promenama 2016. godine, ubrzano se radi na zameni fosilnih goriva (emitera GSB) obnovljivim izvorima energije (OIE). U elektroenergetske sisteme (EES) se uvode sve veće snaga intermitentnih (naglo promenljivih) energetske izvora, u prvom redu solarnih i vetroelektrana. Sa povećavanjem udela takvih elektrana javljaju se problemi sa balansiranjem i bilansiranjem sistema. Pri planiranju daljih razvoja, elektroprivrede primenjuju različite kriterijume pokrivanja potrošnje u EES, sagledavajući pre svega tržišno-ekonomske aspekte i usvojene međunarodne obaveze. Analize su pokazale da uključivanje u EES više od 20% intermitentnih energetske izvora može dovesti do značajne destabilizacije sistema [1]. Takođe, svedoci smo da su neretko faktori koji mogu uticati na energetske stabilnost i tržište električne energije i neenergetskog karaktera (geopolitička situacija, epidemije i sl.). Zbog toga je neophodno sprovesti planske i dugoročno strateški osmišljene mere pripremanja uređaja za skladištenje viškova

energije koje je moguće koristiti u periodima deficita, što je i predstavljeno kao jedan od ciljeva Strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine.

Iako se oblast tehnologije skladištenja energije poslednjih godina ubrzano razvija, reverzibilne hidroelektrane (RHE) i dalje predstavljaju najznačajniji kapacitet za skladištenje. Posebno su značajne RHE sa većom zapreminom gornje akumulacije, koje imaju mogućnost brzog prelaska iz pumpnog u turbinski režim (kada potrebe konzuma to zahtevaju) i iz turbinskog u pumpni režim, u uslovima pojave viškova energije (npr. zbog povoljnih uslova za rad solarnih i vetroelektrana). Udeo kapaciteta RHE u ukupnim instalisanim kapacitetima za skladištenje energije, na globalnom nivou, iznosili su oko 90% krajem 2020. godine (172,5 GW RHE u odnosu na 191 GW ukupnog kapaciteta) [1]. Prema procenama IRENA, kapacitet RHE u svetu bi trebalo do 2030. godine da iznosi 300GW, a 2050. godine 325 GW.

U elektroenergetskom sistemu Srbije postoji jedna reverzibilna elektrana (RHE Bajina Bašta) i pumpno akumulaciono postrojenje Lisina u okviru sistema HE Vlasina, a u završnim fazama izrade tehničke dokumentacije je i RHE Bistrica. Pored ovih postrojenja, u prethodnom periodu je razmatrana (dokumentacija na nivou idejnog projekta) za RHE Đerdap 3 u više varijanti, sa jednom ili dve gornje akumulacije. Instalirana snaga postojeće RHE Bajina Bašta je 614/620 MW, PAP Lisina 28,6 MW. Očekuje se da planirana RHE Bistrica sa instalisanim kapacitetom od 628 MW uđe u pogon do 2032.g. Prema Strategiji razvoja energetike u periodu od 2030. do 2040. godine očekuje se značajno povećanje instaliranih kapaciteta vetroelektrana 3,6 GW i solarnih elektrana čak 7,36 GW, a samim tim i veće potrebe za izgradnjom balansnih kapaciteta koji mogu obezbediti energetske nezavisnost sistema. Imajući u vidu trend uključivanja u sistem sve većih snaga intermitentnih energetske izvora (posebno vetroelektrana) kao i činjenicu da su RHE sistemi za čije projektovanje i realizaciju je potrebno značajno vreme, potrebno je već sada analizirati pogodne lokacije za izgradnju takvih sistema.

Izbor lokacija RHE i PAP se tradicionalno obavlja ekspertskim pristupom, koji se zasniva na poznavanju konfiguracije i parametara postojećih HE, kapaciteta i programa razvoja prenosne mreže, zatim na analizi topografskih karata različitih razmera u cilju sagledavanja hidrografske i topografske karakteristika prostora, analizi raspoloživih hidroloških podataka, geoloških i hidrogeoloških karata i dr. U državama koje imaju pogodnu topografske i hidrološke karakteristike za formiranje RHE i PAP, kakva je Srbija, ovakav pristup ne omogućava

identifikaciju svih potencijalnih lokacija za formiranje takvih sistema.

Sa razvojem savremenih GIS alata i tehnika daljinske detekcije omogućeno je automatizovanje i veoma efikasno pretraživanje terena. Od sredine prve decenije 21. veka ove tehnike počinju da se koriste i za identifikaciju pogodnih lokacija za formiranje akumulacija uglavnom za manja hidroenergetska postrojenja. Uspesnost ovih metoda i razvoj digitalnih modela terena sve veće rezolucije uticao je na ubrzani razvoj ovih tehnika, koje se od početka druge decenije 21. veka počinju koristiti i za veća hidroenergetska postrojenja, kao i za izbor lokacija reverzibilnih HE različitih tipova.

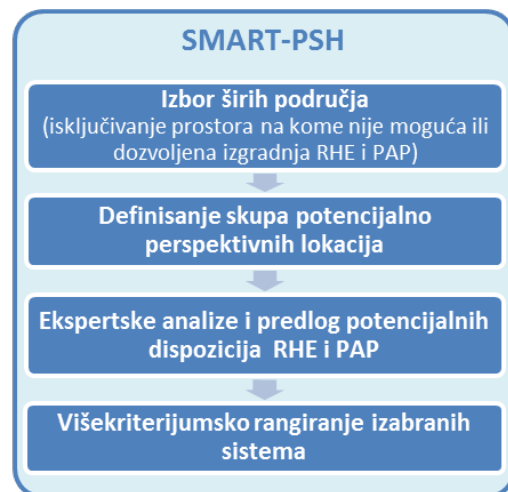
U prethodnih 10-tak godina GIS alati i metode višekriterijumskog rangiranja korišćeni su za analizu mogućnosti izgradnje reverzibilnih i pumpno-akumulacionih postrojenja na različitim područjima (Španija [2], Turska [3], Egipat [4], Iran [5], Tibet [6] i dr.). Analize objavljene u naučno-stručnoj literaturi uglavnom se odnose na analizu manjih područja i izbor lokacije gornjih akumulacija koje sa postojećom akumulacijom postaju deo reverzibilnog ili pumpno-akumulacionog hidroenergetskog sistema.

Jedan od načina rešavanja problema „skladištenja“ energije, koji postaje aktuelan poslednjih nekoliko godina, je izgradnja RHE zatvorenog tipa [7], odnosno postrojenja kod kojih se ni donja ni gornja akumulacija ne nalaze na vodotoku (termini koji se koriste u stručnoj literaturi: *closed-loop*, *off-river* ili *off-stream pumped storage hydropower plant*). Zadatak takvih postrojenja je da rade u pumpnom režimu u periodu kada je moguća proizvodnja energije u vetro- i solarnim elektranama, a potrošnja u sistemu je mala. Ulazeći u sistem kao potrošač električne energije, RHE omogućava rad vetro- i solarnih elektrana za pumpanje vode iz donje u gornju akumulaciju. Na taj način se energija „skladišti“, kako bi se koristila u periodima kada su uslovi za proizvodnju nepovoljni, a potrebe su veće od moguće proizvodnje. Kod hidroelektrana zatvorenog tipa akumulacije se ne formiraju pregrađivanjem vodotoka, što omogućava korišćenje većeg broja lokaliteta za njihovo formiranje. Međutim, i u tom slučaju akumulacija mora biti u blizini vodotoka kako bi se omogućilo inicijalno punjenje akumulacije, kao i kasnija dopuna sistema.

U ovom radu prikazana je nova metodologija za izbor perspektivnih lokacija za formiranje RHE i PAP, pod nazivom SMART-PSH - *Site Mapping And Ranking Technique for Pumped Storage Hydropower plants*. Metodologija je razvijena u okviru Studije o mogućnostima izgradnje reverzibilnih hidroelektrana i pumpno akumulacionih postrojenja u Srbiji, koju su izradili Energoprojekt-Hidroinženjering i Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, za potrebe „Elektroprivreda Srbije“ ad. Metodologija koristi kombinovani pristup - automatizovano pretraživanje prostora, ekspertsku analizu pogodnih lokacija i metode višekriterijumskog rangiranja. Sastoji se iz nekoliko koraka (slika 1):

1. izbor širih područja, odnosno isključivanje prostora na kome nije moguća ili dozvoljena izgradnja RHE i PAP,
2. izbor perspektivnih lokacija,
3. ekspertске analize i izbor potencijalnih RHE i PAP,
4. rangiranje izabranih sistema.

U nastavku rada navedeni koraci će biti detaljno opisani.



Slika 1. SMART-PSH metodologija izbora perspektivnih lokacija RHE i PAP

II IZBOR ŠIRIH PODRUČJA POGODNIH ZA FORMIRANJE RHE I PAP

Prilikom izbora perspektivnih lokacija za realizaciju RHE i PAP prvi korak je izbor širih prostora (područja) unutar kojih će se izvršiti dalja selekcija perspektivnih lokacija. To podrazumeva da se isključe svi prostori koji nisu pogodni za formiranje RHE ili PAP sistema, kao i prostori na kojima formiranje ovih sistema nije moguće ili nije dozvoljeno (slika 2). Područja koja ulaze u šira područja pogodna za formiranje RHE i PAP moraju da zadovolje kriterijume navedene u nastavku.

Topografski kriterijum podrazumeva da se iz daljih analiza izbace/eliminišu područja koja ne ispunjavaju određene orografske karakteristike za formiranje reverzibilnog postrojenja.

Kao topografska osnova za prostorne analize korišćena je GIS tehnologija sa digitalnim modelom terena u rasterskom formatu SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), rezolucije 1“.

Površina Srbije podeljena je rasterskom mrežom (grid) jedinične ćelije 1×1 km. Za svaki od razmatranih delova mreže određene su minimalne i maksimalne kote koje se porede sa ekstremnim vrednostima kota delova grida na osnovu četiri usvojena topografska podkriterijuma:

- topo-kriterijum 1 - za rastojanje od 6 km minimalna denivelacija između ekstrema grida iznosi 150 m.
- topo-kriterijum 2 - za rastojanje od 9 km minimalna denivelacija između ekstrema grida iznosi 225 m.
- topo-kriterijum 3 - za rastojanje od 12 km minimalna denivelacija između ekstrema grida iznosi 300 m
- topo-kriterijum 4 - za rastojanje od 15 km minimalna denivelacija između ekstrema grida iznosi 375 m

Na ovaj način iz daljih analiza su isključena ravničarska područja koja ne ispunjavaju uslove za formiranje hidroenergetskih postrojenja.

Kriterijumi životne sredine je važan kriterijum kojim se iz daljih analiza isključuju zaštićena prirodna dobra, odnosno oni prostori na kojima je zakonski zabranjena izgradnja hidroenergetskih objekata. Prema Zakonu o zaštiti prirode („Službeni glasnik RS“,

br. 71/2021) to su sva zaštićena područja I, II i III stepena zaštite: rezervati prirode, nacionalni parkovi, parkovi prirode, spomenici prirode, zaštićena staništa i predeli izuzetnih odlika. Memorijalni prirodni spomenici i prirodni prostori oko nepokretnih kulturnih dobara (koji su zaštićeni zakonima o zaštiti životne sredine koji su važili pre 2009. godine), kao i rezervati biosfere, takođe su isključeni iz daljih analiza. Ukupna površina zaštićenih područja na teritoriji Srbije iznosi 6737,95 km², što čini oko 7,61% ukupne teritorije Republike Srbije.

Kriterijumi prostornog zauzeća isključuju područja na kojima je realizovana ili plansko prostornom dokumentacijom predviđena izgradnja poslovno-stambenih kompleksa, industrijskih kompleksa, objekata za eksploataciju mineralnih sirovina, značajnih objekata infrastrukture, turističkih područja i sl. Pored toga, isključena su i područja u zoni od 300 m od kulturno-istorijskih dobara koja su prema Zakonu o kulturnim dobrima svrstana u kategorije kulturnih dobara od izuzetnog i velikog značaja. Za prostorne analize sprovedene korišćenjem GIS tehnologije, korišćeni su CORINE Land Cover podaci.

Hidrografski kriterijum definiše šire zone oko vodotoka u kojima je moguće formiranje RHE. Ovaj kriterijum (blizina hidrografske mreže, odnosno blizina vodotoka) je neophodan kako bi se omogućilo punjenje akumulacije vodom i neometana eksploatacija objekata, bez obzira o kom tipu RHE se radi (sistemu otvorenog ili zatvorenog tipa). Navedene zone definisane su oko vodotoka koji imaju dovoljan kapacitet/protok koji može da obezbedi takav nesmetan rad objekata. Vodotoci u Srbiji podeljeni su na vodotoke 1. i 2. reda (prema podeli definisanoj u važećoj Strategiji upravljanja vodama na teritoriji Republike Srbije), pri čemu su vodotoci 1. reda značajniji vodotoci nad kojima nadležnost ima Republika, odnosno autonomna pokrajina, dok je za vode 2. reda zadužena lokalna samouprava. Analize hidroloških karakteristika vodotoka pokazale su da većina vodotoka 1. reda ima prosečan protok veći od 1 m³/s, mada ovoj grupi pripadaju i neki vodotoci koji imaju manji protok. Pošto su vodotoci 2. reda sa slabijim hidrološkim karakteristikama, oni su izuzeti iz daljih analiza.

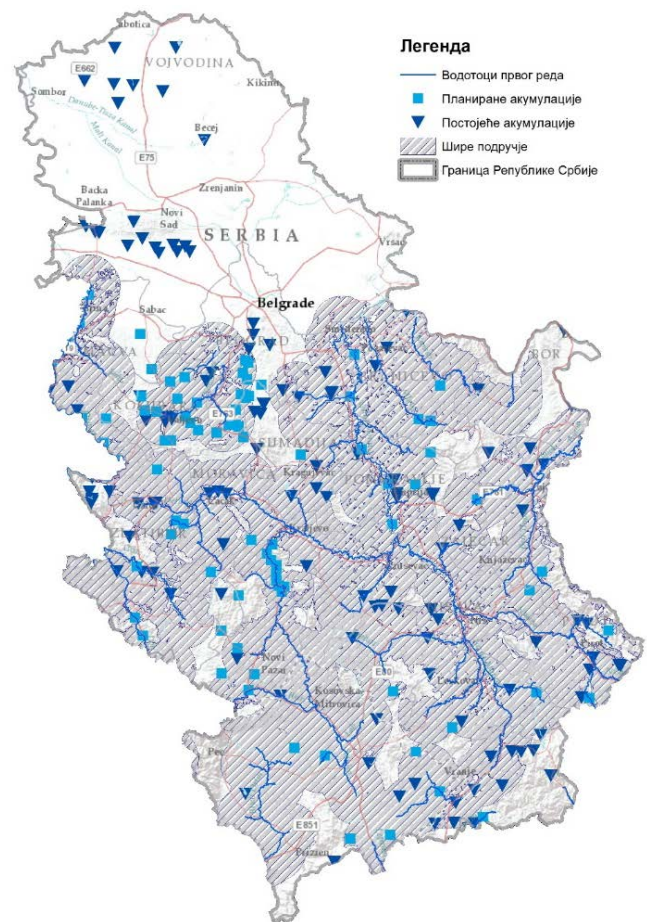
Prema hidrografskom kriterijumu, šire područje koje ulazi u narednu fazu analize, definisano je kao područje u zoni vodotoka 1. reda, maksimalne udaljenosti 15 km sa obe strane vodotoka, odnosno unutar koridora najmanje širine 30 km. Na osnovu analize postojećih projekata, ocenjeno je da je upravo udaljenost od 15 km između dve potencijalne akumulacije otvorenog sistema granično prihvatljiva za izgradnju, pri čemu bi donja akumulacija bila locirana upravo na vodotoku 1 reda, a gornji rezervoar u obližnjoj zoni. U slučaju zatvorenih sistema je takođe neophodno postojanje obližnjeg vodotoka sa dovoljnim i konstantnim doticajem koji bi služio za prvo punjenje akumulacija, kao i za naknadnu dopunu sistema usled gubitaka vode tokom eksploatacije.

Hidrološki kriterijum u vezi je sa hidrografskim kriterijumom. Zasniva se na analizi prosečnih godišnjih protoka kako bi se izdvojili najvodniji delovi vodotoka pogodni za formiranje RHE. Ovaj kriterijum primenjuje se na delove vodotoka 1. reda koji na osnovu ostalih kriterijumima nisu isključeni iz daljih analiza.

Primena hidroloških kriterijuma sastoji se iz dva koraka:

1. Definisanje prosečnih protoka - urađeno je na osnovu dostupnih podataka za 151 hidrološku stanicu. Na osnovu prosečnih protoka na lokacijama tih stanica, i njihovih slivnih površina definisane su regionalne zavisnosti (odnosno, zavisnosti specifičnog oticaja i slivne površine) za veće slivove (npr. sliv reke Ibar ili sliv reke Lim). Topološki sortirani i orijentisani vodotoci su podeljeni na segmente dužine od po nekoliko kilometara, pri čemu je poznata slivna površina svakog čvora, odnosno uzvodnog i nizvodnog profila segmenta vodotoka. Slivne površine su određene primenom softvera 3DNet-Catch. Na osnovu slivne površine čvora, i definisane regionalne zavisnosti za taj sliv sračunati su specifični oticaji, odnosno prosečni protoci [8] [9].

2. Definisanje širih područja za izgradnju RHE, odnosno isključivanje iz daljih analiza onih zona vodotoka koje imaju prosečan protok manji od definisanog praga. Granična vrednost protoka određena je nakon analize odnosa prosečnog protoka i protoka koje je neophodno obezbediti u vodotoku za ekološke potrebe (ekološki protok). Analize su sprovedene na osnovu krivih trajanja protoka za sušne godine, na osnovu čega je kao granična vrednost usvojen protok od 2 m³/s. Nakon definisanja ove granične vrednosti definisana su šira područja u kojima je moguće formiranje RHE, kao zone širine 15 km sa obe strane delova vodotoka 1. reda koji imaju prosečan proticaj Q_{sr} veći od 2 m³/s.



Slika 2. Pregledna karta Srbije sa obeleženim širim područjima pogodnim za formiranje RHE i PAP

Kriterijum postojećih i planiranih objekata nakon eliminacije područja koja ne zadovoljavaju neki od prethodno opisanih kriterijuma, u dalju analizu se uključuju svi postojeći i planirani vodoprivredni objekti (akumulacije) koji ispunjavaju sledeća dva kriterijuma: srednji protok na profilu brane je veći od $1 \text{ m}^3/\text{s}$ i ukupna zapremina akumulacije je veća od $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. U šire područje uključuju se navedeni vodoprivredni objekti kao i zona oko svakog objekta poluprečnika 15 km (što je definisano kao najveće rastojanje između donje i gornje akumulacije). Podaci o akumulacijama su preuzeti iz različitih, javno dostupnih dokumenata, kao što su: Vodoprivredna osnova RS [10], Strategija upravljanja vodama na teritoriji RS do 2034. godine [11], zbornici radova sa kongresa Jugoslovenskog društva za visoke brane, različite studije i projekti, kao i dokumentacija iz sopstvene arhive Energoprojekt Hidroinženjeringa. Navedene kriterijume zadovoljavaju 32 postojeće akumulacije, 26 planiranih akumulacija, 10 planiranih kaskadnih hidroelektrana na Ibru [12] i 29 retenzionih prostora na slivu reke Kolubare [13].

III DEFINISANJE SKUPA POTENCIJALNO PERSPEKTIVNIH LOKACIJA POGODNIH ZA DALJE ANALIZE

Nakon definisanja širih prostora u kojima će biti sprovedene analize, neophodno je definisati prostorne entitete koji će reprezentovati potencijalne lokacije akumulacija RHE. Za izbor potencijalnih lokacija razmatrana je kompletna hidrografska mreža unutar širih zona, koja je podeljena u segmente, pri čemu se vodilo računa o položajima pritoka, kao i da segmenti nemaju dužine veće od nekoliko km. Svaki segment rečnog toka predstavlja potencijalnu lokaciju brane sa akumulacijom. Segmenti su predstavljeni položajem centra deonice, srednjom kotom, srednjim podužnim padom i prosečnim protokom (rangom protoka), kao i sa ostalim statističkim parametrima koji mogu poslužiti u daljim analizama.

Postojeći i planirani objekti (brane sa akumulacijama) predstavljeni su svim pripadajućim rečnim deonicama unutar akumulacije, položajem brane i eventualne hidroelektrane (ukoliko postoji), kao i kotom normalnog radnog nivoa, prosečnim protokom i korisnom zapreminom akumulacije. Rečne deonice koje su pod usporom postojećih ili planiranih objekata isključene su iz daljih analiza. Pored deonica rečnih tokova i postojećih objekata, u okviru širih područja od interesa identifikovane su približno horizontalne površi (prosečnog pada ispod 2%), na kojima bi potencijalno bila izvodljiva izgradnja akumulacija sa nasipom po celom obodu. Ove površi su reprezentovane položajem centra površi (poligona), vrednostima svojih površina, srednjim kotama i srednjim podužnim padom.

Svi prostorni entiteti koji su definisani kao potencijalne lokacije podvrgnuti su detaljnijim prostornim analizama u cilju isključivanja nepovoljnih lokacija. Za to su korišćena četiri kriterijuma:

- Zapremina (potencijalne) akumulacije - eliminisane su sve rečne deonice koje imaju prosečan podužni pad veći od 5% (zbog činjenice da bi se zbog velikog pada rečne deonice dobila neracionalno mala zapremina akumulacije u odnosu na branu), kao i približno horizontalne površine (pada manjeg od 2%) koje u kontinuitetu nemaju površinu veću od $1,5 \text{ km}^2$

(površine pogodne za formiranje rezervoara u nasipu zapremine najmanje $3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$),

- Međusobno rastojanje između donje i gornje lokacije mora biti manje od 15 km,
- Međusobna visinska razlika između donje i gornje lokacije mora biti veća od 150 m,
- Prosečan pad (visinska razlika/rastojanje) između donje i gornje lokacije mora biti veći od 2,5%.

IV EKSPERTSKE ANALIZE I PREDLOG POTENCIJALNIH DISPOZICIJA RHE I PAP

Nakon navedenih analiza, koje se mogu sprovoditi automatizovano primenom GIS alata, prelazi se na ekspertsku selekciju potencijalno perspektivnih lokacija. Ova analiza podrazumeva pregled svih potencijalnih lokacija, definisanje pregradnih profila brana na potencijalnim lokacijama i maksimalnih zapremina akumulacija za te profile, kao i definisanje parova akumulacija sa trasom derivacije između tih akumulacija, koje reprezentuju sisteme RHE i PAP od značaja za dalje analize.

U okviru ove faze se, za svaku lokaciju, odnosno za svaki definisani sistem (par akumulacija sa derivacijom), određuju vrednosti svih kriterijuma koji će se koristiti u narednom koraku za rangiranje sistema. Pored ranije navedenih osnovnih parametara, kao što su rastojanje između akumulacija, visinska razlika, nagib između lokacija potencijalnih akumulacija, definiše se i niz drugih karakteristika, prema kojima će se u narednom koraku rangirati definisani sistemi: morfometrijske karakteristike lokacije (nagibi bočnih kosina, oblik i veličina doline, prisustvo prevoja), opšte geološke i hidrogeološke karakteristike lokacije (karakteristike geološke građe i tektonike, mogućnost izrazitih karstnih pojava, pojava sa hidrogeološkom funkcijom, stabilnost terena i dr.), postojanje domaćinstava i poljoprivrednih površina u blizini potencijalnog pregradnog mesta i u zoni akumulacije, postojanje infrastrukturnih sistema (putevi i železnice) u zoni akumulacije, mogući uticaj na životnu sredinu, mogući uticaj na kulturno-istorijsko nasleđe i dr.

V RANGIRANJE IZABRANIH SISTEMA

Za rangiranje RHE i PAP sistema, koji su nakon ekspertске analize identifikovani kao potencijalno perspektivni, koriste se metode višekriterijumskog rangiranja. Analiza svih potencijalnih lokacija sprovodi se SSF metodom, dok se finije rangiranje izabranih sistema sprovodi VIKOR metodom.

SSF - Site suitability factor metoda

Jedinstvena vrednost parametra koji je definisan kao faktor pogodnosti lokacije (SSF - *site suitability factor*) ocenjuje pogodnost perspektivne lokacije za realizaciju RHE i PAP pri HE. Faktor pogodnosti lokacije određuje se kao suma ponderisanih vrednosti kriterijuma, odnosno vrednosti kriterijuma pomnoženih sa normalizovanim vrednostima težinskih koeficijenta za odgovarajuće kriterijume, prema opštem izrazu:

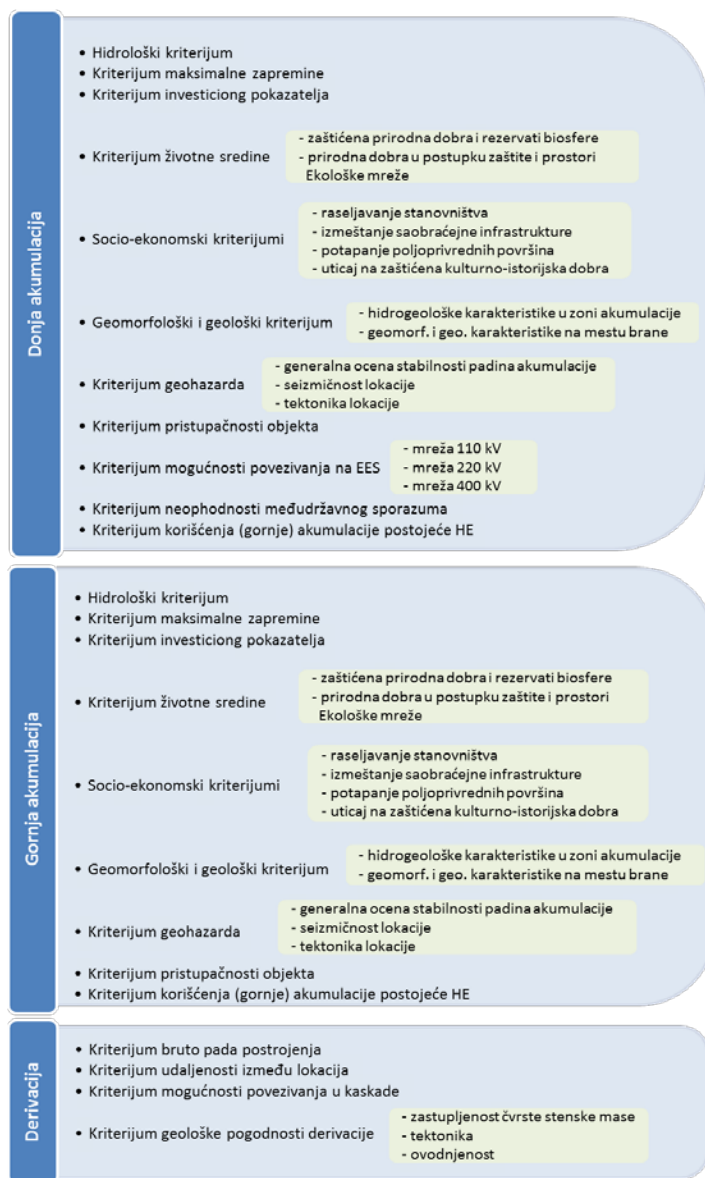
$$SSF = \sum_{i=1}^n w_i \cdot F_i$$

gde su:

- w_i - normalizovana vrednost težinskog koeficijenta za i -ti kriterijum ($\sum_{i=1}^n w_i = 1$),
 F_i - vrednost (ocena) i -tog kriterijuma,
 n - broj kriterijuma.

Svi kriterijumi definisani su tako da se radi o funkcijama maksimizacije i svi imaju vrednost između 0 (najlošija) i 5 (najbolja). Podeljeni su u dve grupe: kriterijumi za ocenu pogodnosti lokacije brane/akumulacije i kriterijumi za ocenu pogodnosti derivacije. Za svaki definisani sistem (RHE ili PAP) posebno se vrednuju tri dela sistema (slika 3):

- donja akumulacija sa 11 kriterijuma,
- gornja akumulacija sa 9 kriterijuma, i
- derivacija sa 4 kriterijuma.



Slika 3. Kriterijumi i podkriterijumi pojedinih delova sistema koji se vrednuju u okviru SSF metode

Težinskim koeficijentima definiše se značaj kriterijuma i taj koeficijent ima značajnu ulogu u određivanju faktora pogodnosti lokacije. Da bi se subjektivizam u oceni sveo na najmanju

moguću meru ove koeficijente određuju eksperti korišćenjem metode analitičkog hijerarhijskog postupka (AHP). Postupak podrazumeva da se posebno vrednuju kriterijumi za donju akumulaciju (11 kriterijuma) - w_i , gornju akumulaciju (devet kriterijuma) - w_j i kriterijumi koji se odnose na derivaciju (četiri kriterijuma) - w_k . U okviru ove metodologije posebno se vrednuje i značaj četiri socio-ekonomska podkriterijuma. Vrednosti težinskih koeficijenata definišu se posebno za svaki od navedena tri dela sistema: donje akumulacije (w_{DA}), gornje akumulacije (w_{GA}) i derivacije (w_D), nakon čega se određuje jedinstvena vrednost SSF-a sistema.

$$SSF = w_{DA} \sum_{i=1}^{11} w_i \cdot F_i + w_{GA} \sum_{j=1}^9 w_j \cdot F_j + w_D \sum_{k=1}^4 w_k \cdot F_k$$

indeksi i, j, k odnose se na donju, gornju akumulaciju i derivaciju, respektivno, a za svaku važi $\sum_{z=1}^n w_z = 1$.

Lokacije koje imaju veću vrednost faktora pogodnosti lokacije (SSF) pogodnije su za realizaciju RHE ili PAP.

Kriterijumi i podkriterijumi za ocenu pogodnosti lokacije brane/akumulacije sistematizovani su u nastavku i prikazani na slici 3.

1. *Hidrološki kriterijum* (Q_{sr}) - zavisi od prosečnih protoka vodotoku na razmatranoj lokaciji. Protoci su grupisani u nekoliko klasa, pri čemu su granice klasa i ocene različite za donju i gornju akumulaciju. Donja akumulacija ima stroža ograničenja pošto je predviđena i za primarno punjenje sistema vodom. Minimalni protok za donju akumulaciju iznosi $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (prema ranije primenjenom hidrološkom kriterijumu), dok za gornju akumulaciju minimalna vrednost nije definisana. Granice klasa određene su na osnovu analize broja postojećih hidroloških stanica sa prosečnim protocima u okviru definisanih klasa. Da bi se postigla preciznija ocena lokacija zona manjih protoka podeljena je u veći broj klasa, a svi vodotoci sa prosečnim protokom iznad $50 \text{ m}^3/\text{s}$ za donju akumulaciju, odnosno $15 \text{ m}^3/\text{s}$ za gornju akumulaciju imaju maksimalnu ocenu 5.

2. *Kriterijum maksimalne zapremine* (V) - odnosi se na maksimalnu moguću zapreminu akumulacije. Ovaj parametar se razlikuje za donju i gornju akumulaciju. Za donju akumulaciju zapremina nije dominantna karakteristika u odnosu na protok, koji treba da omogući brzo punjenje gornje akumulacije, pa minimalna zapremina može da bude i 0, dok se akumulacije sa zapreminom većom od $70 \times 10^6 \text{ m}^3$ ocenjuju maksimalnom vrednošću. Kod gornjih akumulacija zapremina je jedan od najznačajnijih parametara jer od nje zavisi energetski potencijal RHE, kao najvažnija komponenta u svetlu pokrivanja neravnomernosti rada OIE. Minimalna zapremina je definisana kao eliminišući kriterijum u prethodnim koracima i iznosi $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ za RHE otvorenog tipa, odnosno $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ za RHE zatvorenog tipa. Zbog svog značaja, ocene za zapremine gornje akumulacije u oblasti velikih zapremina ($70 - 200 \times 10^6 \text{ m}^3$) detaljnije je podeljena (na 3 klase sa ocenama: 4,25, 4,5 i 4,75), kako bi se bolje istakle lokacije sa značajno velikim potencijalnim zapreminama akumulacije, dok akumulacije sa zapreminom većom od $150 \times 10^6 \text{ m}^3$ dobijaju ocenu 5.

3. *Kriterijum investicionog pokazatelja* (IP) - predstavlja

investicionu vrednost izgradnje pregradnog objekta, odnosno brane. Ovim kriterijumom daje se prednost lokacijama kod kojih je za formiranje akumulacije određene zapremine potrebna izgradnja brane manjih dimenzija. Ovaj parametar određuje se na osnovu: visina brane (h_{br}) i dužina brane u kruni (L_{br}), $IP = \sqrt[3]{h_{br}^2 \cdot L_{br}}$. Najlošiju ocenu 1 dobijaju brane sa vrednostima ovog pokazatelja većim od 240 dok najbolju ocenu dobijaju varijante sa vrednostima IP manjim od 40.

4. *Kriterijumi životne sredine (ŽS)* - postaju sve značajniji prilikom planiranja hidroenergetskih objekata i sve više ograničavaju mogućnost njihove realizacije. Iako postoji niz pozitivnih i negativnih uticaja razmatranih sistema na ekološko okruženje, u ovim analizama koristi se samo udaljenost lokacija u odnosu na zaštićena područja. Vrednosti kriterijuma (ocene) razlikuju se za zaštićena prirodna dobra ili rezervate biosfere (u čijim zonama nije dozvoljeno formiranje akumulacije), u odnosu na prirodna dobra koja se nalaze u nekoj fazi zaštite (ali proces još nije završen) ili prostora Ekološke mreže, za koje su uslovi manje strogi. Na osnovu većeg broja analiza zaključeno je da uticaj akumulacija obično prestaje na udaljenostima većim od 1,5 km, a samo izuzetno, u vetrovitom periodu, osećaju se i na nešto većim rastojanjima. Zbog toga je kao gornja granica za ovaj kriterijum definisano rastojanje od 3 km. U slučaju postojanja više zaštićenih prirodnih dobara ili prostora Ekološke mreže u zoni akumulacije uzima se najnepovoljnija (najmanja) vrednost.

5. *Socio-ekonomski kriterijumi* - hidroenergetski objekti su oduvek imali veoma izraženu socijalnu dimenziju. Njihov pozitivan uticaj ogleda se kroz poboljšavanje ekonomskog i društvenog standarda stanovništva, smanjenje nezaposlenosti, poboljšavanje sanitarnih i komunalnih uslova, stabilnijih uslova privređivanja i niz drugih boljitaka. Međutim, izgradnja takvih objekata, pre svega akumulacija, kao ključnih elemenata tih sistema, zahteva značajne radove u prostoru. Veoma često je neophodno izvršiti izmeštanje saobraćajnica, raseljavanje stanovništva, izmeštanje domaćinstava pa i celih naselja, što dovodi do ozbiljnih socijalnih problema. Zbog toga se ovaj kriterijum sastoji od četiri podkriterijuma:

- *raseljavanje stanovništva* - zasniva se na sagledavanju broja domaćinstava koje je neophodno raseliti sa razmatrane lokacije. Pored značajnih socioloških uticaja na stanovništvo, lokalnu zajednicu i šire, raseljavanje stanovništva ima i ekonomsku komponentu, jer troškovi otkupa i šteta mogu uticati na finansijsku rentabilnost projekta. Prema ovom kriterijumu ocenjuje se izmeštanje do 70 domaćinstava, dok sve lokacije koje zahtevaju izmeštanje većeg broja domaćinstava po ovom kriterijumu dobijaju vrednost 0;
- *potapanje saobraćajne infrastrukture* - dužina puteva (državni putevi 1. i 2. reda) i javne železničke pruge koje će biti pod uticajem akumulacije. Prilikom razmatranja dužine putne mreže koja će se naći pod uticajem buduće akumulacije, sagledavaju se svi postojeći i planirani državni putevi 1. i 2. reda. S obzirom da planirani putevi nemaju isti značaj kao postojeće saobraćajnice, ukupna dužina državnih puteva L_{put} koja bi bila pod uticajem akumulacije se obračunava na sledeći način:

$L_{put} = L_{postojeće} + 0.5 \times L_{planirano}$ Ocena se dodeljuje na osnovu ovako određene dužine potapanja, za potapanja do 7,5 km, dok je u slučaju potapanja dužih deonica ocena akumulacije 0. Na sličan način se računa i dužina železničkih pruga (za dužine do 5 km). Ukupna ocena prema ovom podkriterijumu dobija se kao srednja vrednost ocena za potapanje puteva i železnica;

- *potapanje poljoprivrednih površina* - može imati značajan sociološki i ekonomski uticaj na lokalno stanovništvo, slično kao i raseljavanje. Za procenu ovog uticaja određeno je procentualno učešće zemljišnog pokrivača na lokacijama koje će potencijalno biti zauzete budućim akumulacijama korišćenjem CORINE Land Cover podataka. Pod poljoprivrednim zemljištem podrazumeva se: navodnjavano zemljište, nenavodnjavano obradivo zemljište, vinogradi, plantaže voćnjaka i zrnastog voća, pašnjaci, jednogodišnji i trajni usevi i kompleksi kultivisanih parcela. Vrednosti kriterijuma određuju se na osnovu površine koja se potapa, za površine do 400 ha, dok se za veće površine akumulaciji dodeljuje vrednost 0;
- *uticaj na zaštićena kulturno-istorijska dobra* - vrednuje se na osnovu njihove udaljenosti do najbližeg dela buduće akumulacije. Vrednosti se razlikuju za kulturna dobra od izuzetnog i velikog značaja (čije lokacije sa bafer zonom od 300 m su i eliminacioni kriterijum) u odnosu na kulturna dobra koja su samo upisana u registar. Slično kao u slučaju zaštićenih prirodnih dobara, smatra se da na udaljenostima većim od 3 km uticaj akumulacije ne postoji ni u najnepovoljnijim meteorološkim uslovima. U slučaju postojanja više kulturnih dobara u blizini akumulacije uzima se najnepovoljnija (najmanja) vrednost kriterijuma.

Značaj opisanih podkriterijuma nije isti, pa njihove težine određuju eksperti, na sličan način kao što se određuju i težine pojedinih kriterijuma, primenom AHP metode.

6. *Geomorfološki i geološki kriterijum* - veoma je značajan jer odražava osnovnu pogodnost terena za izgradnju brane i formiranje akumulacije. Određuje se na osnovu dva podkriterijuma:

- hidrogeološke karakteristike u zoni akumulacije, u okviru kojih se analizira pojava ponora, pećina, vrtača, reka ponornica u karstnim terenima, kao i vododrživost osnovne stenske mase, sa istim značajem (izraženim kroz težinske koeficijente) ova dva podkriterijuma od po 0,25;
- geomorfološke i geološke karakteristike na mestu brane, koje se određuju u zavisnosti od nagiba padina u bokovima, vododrživosti i nosivosti osnovne stenske mase, sa težinskim koeficijentima 0,2; 0,15 i 0,15, respektivno.

Vrednosti (ocene) ovih podkriterijuma određuju se ekspertskom procenom na osnovu raspoloživih topografskih, geoloških i hidrogeoloških karata. U slučaju izrazito nepovoljnih uslova lokacija projekta može biti isključena iz daljih analiza.

7. *Kriterijum geohazarda lokacije* - vrednost ovog kriterijuma dobija se analizom tri podkriterijuma: generalna ocena stabilnosti

padina akumulacije - pojave nestabilnosti u vidu klizišta i odrona, seizmičnost i tektonika lokacije. Značaj ovih podkriterijuma je dosta sličan, sa vrednostima 0,3; 0,35 i 0,35, respektivno. Vrednosti (ocene) ovih podkriterijuma određuju se ekspertskom procenom na osnovu raspoloživih geoloških i seizmoloških karata.

8. *Kriterijum pristupačnosti objekta* - ogleda se kroz blizinu potencijalne lokacije mreži saobraćajnica koja može da obezbedi pristup lokaciji i transport materijala i opreme tokom izgradnje i eksploatacije objekta. Kao referentna mreža saobraćajnica usvojena mreža postojećih i planiranih državnih puteva 1. i 2. reda. Ocenjivanje po ovom kriterijumu izvršeno je na osnovu najkraćeg rastojanja između potencijalne lokacije i mreže puteva za rastojanja do 10 km. Brane koje se nalaze na većem rastojanju ocenjene su ocenom 0.

9. *Kriterijum mogućnosti povezivanja na elektroenergetski sistem* - je još jedan kriterijum koji oslikava ekonomsku opravdanost izbora lokacije. Kao referentni sistem za bodovanje lokacije koristi se blizina moguće lokacije priključenja na prenosni sistem, odnosno mreže u nadležnosti AD Elektromreža Srbije sledećih naponskih nivoa: 110 kV, 220 kV i 400 kV (postojeća mreža i planirani dalekovodi u narednom periodu od 10 godina). Ocenjuju se najkraća rastojanja do mreže sva tri napona, a ukupna ocena predstavlja ponderisani zbir tih ocena, pri čemu težine kriterijuma rastu za mreže većeg napona (iznose: 0,25; 0,35 i 0,4 respektivno za mreže 110 kV, 220 kV i 400 kV). Rastojanja veća od 20 km ocenjuju se ocenom 0. Vrednosti ovog kriterijuma određuju se samo za donju akumulaciju, s obzirom da se mašinska zgrada nalazi u zoni donje akumulacije.

10. *Kriterijum neophodnosti međudržavnog sporazuma* - uveden je imajući u vidu da su reke Dunav i Drina, koje imaju značajan hidrološki i hidroenergetski potencijal, granični vodotoci, pa bi u slučaju izgradnje hidroenergetskog postrojenja, bilo neophodno zaključiti međudržavni sporazum. Zbog neizvesnosti, jer je za realizaciju projekta neophodna saglasnost druge države, vrednost ovog kriterijuma uzima jednu od dve vrednosti: 1 ako je potreban međudržavni sporazum, a 5 ako nije. Vrednosti ovog kriterijuma određuju se samo za donju akumulaciju.

11. *Kriterijum korišćenja (gornje) akumulacije postojeće HE* - ovim kriterijumom se prednost daje onim dispozicijama koje se formiraju pri postojećim akumulacionim hidroenergetskim objektima, bilo da je postojeća akumulacija gornja i donja akumulacija novog sistema. Značaj sistema zavisi od pada sa kojim radi postojeća HE, pa su zavisno od pada (za padove do 100 m) definisane i ocene ovog kriterijuma. Za padove veće od 100 m vrednost kriterijuma je maksimalna.

Kriterijumi za ocenu dispozicija sistema, koji se primenjuju na parove gornjih i donjih akumulacija

1. *Kriterijum bruto pada postrojenja* - ocenjuje se na osnovu vrednosti bruto pada, koje su određene u okviru prostornih analiza. Ocenjivanje po ovom kriterijumu razlikuje se za RHE i PAP postrojenja. Za RHE ocena se dodeljuje zavisno od samog bruto pada i ocena raste sa povećanjem pada. Minimalna vrednost pada ograničena je eliminacionim kriterijumima iz prethodne faze i iznosi 150 m, dok su sistemi sa padom većim od 500 m ocenjeni maksimalnom ocenom. Kod PAP postrojenja

analizira se odnos pada sa kojim radi HE i potrebne visine pumpanja. Sa porastom vrednosti tog odnosa raste i ocena, pri čemu u analizu ne ulaze dispozicije sa odnosom manjim od 2 (duplo veći pad turbine u odnosu na visinu pumpanja). Dispozicije kod kojih je visina turbiniranja 5 puta veća od visine pumpanja dobijaju maksimalnu ocenu.

2. *Kriterijum udaljenosti između lokacija* - je pored visinske razlike jedan od najznačajnijih parametara dispozicije RHE i PAP. Sa povećanjem udaljenosti između akumulacija povećava se investiciona vrednost sistema, pa su objekti sa kraćim međusobnim rastojanjem ekonomski opravdaniji. Pored toga, dugački objekti imaju veću inertnost sistema i sporije odgovore na zahteve elektroenergetskog sistema, kao i veću ranjivost sa stanovišta izvođenja radova i eksploatacije. U analizu nisu mogli da uđu sistemi sa udaljenošću između akumulacija većom od 15 km, jer je to eliminišući kriterijum u prethodnom koraku. Sistemi sa ovima rastojanjem manjim od 3 km ocenjuju se najvišom ocenom.

3. *Kriterijum mogućnosti povezivanja u kaskade* - favorizuje dispozicije sa lokacijama koje su tako pozicionirane da na dovoljno maloj udaljenosti imaju dovoljnu visinsku razliku između neke druge niže lokacije i neke druge više lokacije, pa tako predstavljaju kandidata za uklapanje objekta u kaskadni hidroenergetski sistem. Vrednost ovog kriterijuma uzima dve vrednosti: 1 ako ne postoji mogućnost uklapanja u kaskadni sistema i 5 ako takva mogućnost postoji.

4. *Kriterijum geološke pogodnosti derivacije* - pored ocene geološke pogodnosti za izgradnju brane i formiranje akumulacije/rezervoara, formiran je i kriterijum za ocenjivanje geološke pogodnosti derivacije, odnosno veze između akumulacija. Ocena kriterijuma donosi se na osnovu tri podkriterijuma: zastupljenost čvrste stenske mase, tektonika (gustina i nepovoljnost orijentacija) i ovodnjenost, kao zbir njihovih ponderisanih vrednosti, sa nešto većom značajnošću prvog podkriterijuma (težinski koeficijent od 0,4) u odnosu na preostala dva (težina 0,3).

VIKOR metoda za rangiranje RHE i PAP

Nakon rangiranja perspektivnih RHE i PAP sistema primenom SSF metode, najbolje ocenjeni sistemi detaljnije se rangiraju korišćenjem VIKOR metode. Za razliku od SSF metode, u kojoj se rangiranje obavlja na osnovu ocena dodeljenih za raspone vrednosti kriterijuma, VIKOR metoda koristi tačne vrednosti fizičkih karakteristika sistema (kao što su bruto pad, udaljenost između akumulacija i sl.), kao i neke druge karakteristike koje se ne mogu predstaviti konkretnim fizičkim veličinama (neophodnost međudržavnih dogovora, geološki uslovi i sl.). Metoda VIKOR (VIšekriterijumsko KOMpromisno Rangiranje) razvijena je 80-tih godina na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu [14]. Alternative se rangiraju na osnovu elemenata iz kompromisnog programiranja, polazeći od graničnih formi L_p metrike. Neophodni ulazni podaci su vrednosti svih kriterijumskih funkcija za sve alternative, koje se zadaju u vidu matrica, kao i faktori značajnosti (težinski koeficijenti) za svaki kriterijum. Težinske koeficijente određuju eksperti korišćenjem AHP metode. Za rangiranje RHE i PAP koristi se 12 kriterijuma, koji su opisani u nastavku.

1. *Bruto pad postrojenja* je važan dispozicioni parametar svakog reverzibilnog, odnosno pumpno-akumulacionog postrojenja. To je pad sa kojim sistem radi u turbinskom režimu. U slučajevima kada je moguće energetske korišćenje vode u okviru kaskadnog sistema uzima se pad kaskade. Kriterijum bruto pada je kvantitativni kriterijum, čije se vrednosti izražavaju u metrima, a radi se o funkciji koja se maksimizira.

2. *Udaljenost između gornje i donje akumulacije* je takođe veoma važan dispozicioni parametar koji utiče na investicionu vrednost razmatranog sistema, energetske gubitke, pouzdanost i radne performanse. Sve ove karakteristike poboljšavaju se sa smanjenjem rastojanja između akumulacija. Kriterijum udaljenosti između akumulacija je kvantitativni kriterijum, čije se vrednosti izražavaju u kilometrima, a radi se o funkciji koja se minimizira.

3. *Relativna energetska vrednost gornje akumulacije* kriterijum je preko koga se vrednuje zapremina gornje akumulacije. Određuje se kao odnos energetske vrednosti gornje akumulacije i bruto pada: $E_{GA,r} = (V_{GA} \cdot \eta) / 367 \text{ [kWh/m]}$. Ovaj parametar je izabran umesto energetske vrednosti gornje akumulacije, jer ne zavisi od pada sa kojim radi postrojenje u turbinskom režimu, što je parametar koji je već definisan kao jedan od kriterijuma, pa se izbegava njegovo ponovno korišćenje. Parametar je funkcija zapremine gornje akumulacije, a koeficijent korisnog dejstva za sva postrojenja je isti i iznosi 0,85. Vrednost ovog kriterijuma izražava se u kWh/m, a radi se o funkciji maksimizacije.

4. *Relativna energetska proizvodnja iz dotoka u gornju akumulaciju* je kriterijum kojim se vrednuje dotok u gornju akumulaciju sa sopstvenog sliva. Prilikom određivanja količine vode koju je moguće energetske iskoristiti ($V_{GA,sop}$) pretpostavlja se da je u vodotoku nizvodno od pregradnog profila (brane) potrebno obezbediti ekološki protok u količini od 20% od prosečnog protoka. Relativna energetska proizvodnja iz dotoka u gornju akumulaciju određuje se na sličan način kao relativna energetska vrednost gornje akumulacije, uz iste pretpostavke: $E_{GA,r} = (V_{GA,sop} \cdot \eta) / 367 \text{ [kWh/m]}$. Vrednost ovog kriterijuma izražava se u kWh/m, a radi se o funkciji maksimizacije.

5. *Pokazatelj mogućeg pumpanja iz donje akumulacije* je kriterijum kojim se u analizu uključuju hidrološke karakteristike vodotoka u zoni donje akumulacije. S obzirom da se na ovom nivou detaljnosti razrade ne raspolaže podacima za sprovođenje bilansnih i drugih detaljnijih analiza, vrednosti ovog kriterijuma određuju se na osnovu prosečnog protoka u profilu donje akumulacije. Ovaj kriterijum definisan je preko klase protoka na sličan način kako je to urađeno za SSF metodu. Radi se o kriterijumu koji se maksimizira.

6. *Odnos godišnje proizvodnje od prepumpane vode i utrošene energije na pumpanje* predstavlja količnik moguće godišnje proizvodnje energije u razmatranom sistemu (koji može biti i kaskadni, sa više HE koje koriste vodu koja je prepumpana u gornju akumulaciju) i energije koja je utrošena na pumpanje. Vrednosti zavise od karakteristika derivacije (dužina, prečnici,...) i instalisanog protoka u pumpnom i turbinskom režimu. Za RHE (bez mogućnosti kaskadnog korišćenja) vrednosti ovog kriterijuma su slične, a značajnije razlike mogu se javiti kod

pumpno-akumulacionih elektrana i kaskadnih RHE i PAP sistema. S obzirom da se u ovoj fazi analize ne raspolaže detaljnim podacima o karakteristikama derivacije, vrednosti ovog kriterijuma određuju se kao odnos bruto napora u pumpnom režimu i pada u turbinskom režimu. U slučaju postojanja kaskadnog sistema uzima se bruto pad nizvodnih stepenica na kojima je moguće energetske korišćenje prepumpane vode. Vrednosti ovog kriterijuma su bezdimenzionalne. Za RHE (bez mogućnosti kaskadnog korišćenja) ta vrednost je jednaka 1, dok je za ostale sisteme veća od 1. Radi se o kriterijumskoj funkciji koja se maksimizira.

7. *Investicioni pokazatelj* - vrednost ovog kriterijuma određuje se na isti način kao što je to opisano za SSF metodu, uz razliku da se za vrednovanje u okviru VIKOR metode koriste stvarne vrednosti dobijene na osnovu prikazane relacije, a ne ocene prema klasama vrednosti, kao što je to slučaj kod rangiranja prema SSF metodi. Radi se o kriterijumu koji se minimizira.

8. *Uticaj na životnu sredinu* određuje se na osnovu vrednosti istog kriterijuma za gornju i donju akumulaciju kao u SSF metodi i predstavlja njenu srednju vrednost. Vrednosti se kreću od 5 (ako su obe akumulacije više od 3 km udaljene od zaštićenih prirodnih dobara) do 0, a funkcija se maksimizira.

9. *Sociološki uticaj* određuju se na sličan način kao vrednosti socio-ekonomskog kriterijuma u SSF metodi, a predstavlja srednju vrednost tog kriterijuma za gornju i donju akumulaciju. Vrednosti se kreću u rasponu od 0 do 5, a funkcija se maksimizira.

10. *Geološki uslovi* su veoma značajni za realizaciju hidroenergetskih sistema. Od njih zavisi mogućnost realizacije objekata, njihovo dispoziciono rešenje i troškovi izgradnje. Za potrebe analiza na ovom nivou koriste se samo postojeći podaci (topografske, seizmičke i opšte geološke karte). Za određivanje vrednosti kriterijuma kojim se vrednuju geološki uslovi koriste se ponderisane vrednosti tri geološka kriterijuma koja se koriste u okviru SSF metode: geomorfološko-geološke karakteristike lokacije, geohazard lokacije i geološke pogodnosti za derivaciju, sa težinskim koeficijentima od 0,47; 0,2 i 0,33 respektivno. Ovi kriterijumi detaljno su opisani u prethodnom delu teksta, u okviru SSF metode. Vrednosti se kreću u rasponu od 0 do 5, a funkcija se maksimizira.

11. *Udaljenost mogućeg mesta priključenja na EES* - ovim kriterijumom u rangiranje se uključuje udaljenost sistema od mesta priključenja na elektro-energetsku mrežu. Vrednost kriterijuma je ponderisano rastojanje od lokacije mašinske zgrade do mreže različitog napona (110 kV, 220 kV, 400 kV), sa vrednostima težinskih koeficijenata (pondera) istim kao za SSF metodu. Kriterijumska funkcija se izražava u kilometrima, a radi se o funkciji minimizacije.

12. *Neophodnost međudržavnog dogovora* slično kao kod SSF metode, moguće su samo dve vrednosti ovog kriterijuma: 0 ako nema potrebe za međudržavnim dogovorima i 1 ako su takvi dogovori potrebni. Kriterijumska funkcija se minimizira.

VI ZAKLJUČAK

Metodologija SMART-PSH prikazana u radu omogućava

automatizovano, brzo i efikasno pretraživanje širokih prostora u cilju izdvajanja lokacija pogodnih za formiranje akumulacija. U postupku pretraživanja koristi se veći broj kriterijuma kao što su topografski, hidrološki, zauzeće prostora za različite namene i dr. Nakon ekspertskih analiza izabranih lokacija i izbora perspektivnih RHE i PAP sistema pristupa se njihovom višekriterijumskom rangiranju, što daje konačnu ocenu značajnosti/pogodnosti pojedinih sistema. Na ovaj način moguće je identifikovati i rangirati pogodne lokacije za izgradnju RHE i PAP sistema koje ne bi bile identifikovane klasičnim pristupom ili bi zahtevale angažovanje većeg broja stručnjaka u dužem vremenskom periodu. Identifikovane pogodne lokacije međusobno su upoređive na osnovu opisanih kriterijuma i pružaju kvalitativno dovoljan obim informacija za potrebe strateškog planiranja elektroenergetskih sistema u smislu ulaganja u dalje razrade projektno-tehničkih dokumentacija.

LITERATURA

- [1] Worku, Y.M. Recent Advances in Energy Storage Systems for Renewable Source Grid Integration: A Comprehensive Review, Sustainability, Vol. 14, No. 10, pp. 5985, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14105985>
- [2] Jimenez Capilla, J.A., Aran Carrion, J., Alameda-Hernandez E. Optimal site selection for upper reservoirs in pump-back systems, using geographical information systems and multicriteria analysis, Renewable Energy, Vol. 86, pp. 429-440, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.035>
- [3] Niall, F., Lacal Arántegui, R., McKeogh, E., Leahy, P. A GIS-based model to calculate the potential for transforming conventional hydropower schemes and non-hydro reservoirs to pumped hydropower schemes, Energy, Vol. 41, No. 1, pp. 483-490, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.044>
- [4] Hany, A., Mohamed, M., Saleh, S. A GIS model for exploring the water pumped storage locations using remote sensing data, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, Vol. 24, No. 3, Part 2, pp. 515-523, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.09.006>
- [5] Hassan, A., Shamsai, A. Preliminary Site Selection of Pumped Storage Hydropower Plants - A GIS-based approach, Amirkabir, Journal of Science and Technology, Vol. 41, No. 2, Serial number 2, pp. 25-32, 2009. <https://doi.org/10.22060/miscj.2009.237>
- [6] Xu, L., Wang, S. A GIS-based assessment of Tibet's potential for pumped hydropower energy Storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 69, pp. 1045-1054, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.089>
- [7] Bin, L., Stocks, M., Blakers, A., Anderson K. Geographic information system (GIS) algorithms to locate prospective sites for short-term off-river pumped hydro energy storage, Applied Energy, Vol. 222, pp. 300-312, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.177>
- [8] Vodoprivredna osnova Republike Srbije: Hidrometeorološke podloge, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi" i Republički hidrometeorološki zavod Srbije, 2009.
- [9] Stanić, M., Todorović, A., Vasilić, Ž., Plavšić, J. Extreme flood reconstruction by using the 3DNet platform for hydrological modelling, Journal of Hydroinformatics, Vol. 20, No. 4, pp. 766-783, 2018. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.050>
- [10] Vodoprivredna osnova Republike Srbije, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, 2001.
- [11] Strategija upravljanja vodama na teritoriji Republike Srbije do 2034. godine, <https://www.paragraf.rs/propisi/strategija-upravljanja-vodama-u-srbiji-do-2034.html> [pristupljeno 17.12.2024]
- [12] Idejni projekat i studija opravdanosti HE Bela Glava u sastavu sistema HE na Ibru, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, 2012.
- [13] Studija unapređenja zaštite od voda u slivu reke Kolubare, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd, 2016.
- [14] Opricović, S. Optimizacija sistema, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1992.

AUTORI

Tina Dašić - profesor, Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, mtina@grf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-4679-3101](https://orcid.org/0000-0002-4679-3101)
Ljubodrag Savić - profesor, Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, ljdsavic@grf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-1112-3471](https://orcid.org/0000-0003-1112-3471)
Miloš Stanić - profesor, Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, mstanic@grf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-3410-2393](https://orcid.org/0000-0002-3410-2393)
Andrijana Todorović - docent, Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, atodorovic@grf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1001-9739](https://orcid.org/0000-0002-1001-9739)
Marija Milić - dipl.građ.inž., Energoprojekt-Hidroinženjering a.d., mmilic@ephydro.com, ORCID [0009-0005-7557-0299](https://orcid.org/0009-0005-7557-0299)
Milan Tumara - dipl.inž.geol., Energoprojekt-Hidroinženjering a.d., eph.mtumara@gmail.com, ORCID [0009-0003-9488-1952](https://orcid.org/0009-0003-9488-1952)

A Methodology for Selecting Suitable Sites for Pumped-Storage Hydropower Plants

Abstract – The increasing share of intermittent energy sources, particularly solar and wind power plants, necessitates efficient energy storage to stabilize the power system. The most significant capacity for this purpose is pumped-storage hydropower plants (PSH). This paper presents a new methodology for identifying potential locations for PSH and pump-storage facilities (PSF) at existing hydropower plants - SMART-PSH (Site Mapping And Ranking Technique for Pumped Storage Hydropower plants). The methodology is based on a combination of automated spatial search using GIS tools, expert location analysis, and multicriteria ranking of potential systems. The selection of suitable PSH and PSF sites considers spatial relationships (elevation difference and distance) between reservoirs, hydrological characteristics of the watercourses, and the morphological features of reservoir areas. In addition to these parameters, key factors influencing system evaluation include geological characteristics of the terrain, potential environmental impacts, effects on the population, cultural and historical heritage, infrastructure, and economy, as well as proximity to transportation and power transmission networks, and other factors. The ranking of potential PSH and PSF is conducted based on multiple criteria with varying levels of their significance (weighting coefficients).

Index terms – Pumped-storage hydropower plant, GIS tools, Spatial analyses, Hydrological analyses, Multicriteria ranking