

DOI: [10.46793/CIGRE37.C1.10](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C1.10)**C1.10****ISTRAŽIVANJE TEMPORALNE KOMPATIBILNOSTI RADA RHE  
SA HIDROLOŠKIM I TRŽIŠNIM PRILIKAMA****RESEARCH ON THE TEMPORAL COMPATIBILITY OF PS HPP OPERATION  
WITH HYDROLOGICAL AND MARKET CONDITIONS****Vladimir Šiljkut, Dragan Surudžić, Dušan Petrović, Mileta Đurković\***

Kratak sadržaj: Rad prikazuje metodologiju za istraživanje temporalne kompatibilnosti režimâ rada reverzibilnih hidroelektrana (RHE) sa hidrološkim prilikama, pogonom kapaciteta na obnovljive izvore energije (OIE) sa varijabilnom proizvodnjom električne energije (V-OIE) i tržišnim uslovima. Izloženi su setovi potrebnih ulaznih podataka, način njihovog svođenja, obrade i međusobnog uparivanja i način proračuna predloženih karakterističnih parametara. Na osnovu analize njihovih vrednosti moguće je oceniti stepen kompatibilnosti oba režima rada RHE sa hidrološkim uslovima, proizvodnjom iz V-OIE i cenama električne energije.

Kao studija slučaja razmotren je pogon postojeće RHE „Bajina Bašta” i prikazani su postupak i rezultati primene predložene metodologije. Posmatran je jednogodišnji istorijski period (kalendarska 2023. godina) bez kapitalnih remonata ove RHE i HE „Bajina Bašta” i bez ekstremnih sezonskih hidroloških prilika. Korišćeni su satni podaci o proizvodnji električne energije u RHE i o energiji utrošenoj u njenom pumpnom režimu rada, podaci o proizvodnji iz tada postojećih vetroelektrana u balansnoj grupi Akcionarskog društva „Elektroprivreda Srbije” Beograd (EPS AD), relevantni hidrološki podaci, kao i podaci o ostvarenim satnim cenama električne energije na tržištima „dan unapred” SEEPEX i HUPX i na unutardnevnom tržištu HUPX. Na osnovu rezultata dobijenih primenom ove metodologije na postojeću RHE „Bajina Bašta”, u ovom radu su izvedeni odgovarajući zaključci o ostvarenom stepenu optimalnosti njenog pogona u tom periodu.

Rad ukazuje i na to da predložena metodologija može biti primenjena i na projekte budućih RHE, uz predikciju hidroloških prilika, proizvodnje iz V-OIE i uz projekcije tržišnih cena električne energije na posmatranom vremenskom horizontu. Na taj način bi se mogla oceniti primerenost svake moguće RHE pretpostavljenim fizičkim, tehničkim i tržišnim uslovima i sa te strane dodatno istražiti njena tehno-ekonomska i finansijska isplativost. U tom pogledu, rad najavljuje nastavak ovog istraživanja, primenom ove metodologije na projekte RHE koji su u EPS AD u fazi razvoja i izrade investiciono-tehničke dokumentacije, prvenstveno na aktuelni projekat RHE „Bistrica”.

---

\* Vladimir Šiljkut, Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, [vladimir.siljkut@eps.rs](mailto:vladimir.siljkut@eps.rs)  
Dragan Surudžić, Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, [dragan.surudzic@eps.rs](mailto:dragan.surudzic@eps.rs)  
Dušan Petrović, Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, [dusan.petrovic@eps.rs](mailto:dusan.petrovic@eps.rs)  
Mileta Đurković, Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, [mileta.djurkovic@eps.rs](mailto:mileta.djurkovic@eps.rs)

**Ključne reči:** *Akumulacija, vetroelektrana, dotok, reverzibilna hidroelektrana, cena električne energije*

**Abstract:** The paper presents a methodology for investigation of temporal compatibility of pump storage hydroelectric power plants' (PS HPP) operating modes with hydrological conditions, operation of renewable energy sources (RES) with variable electricity generation (V-RES), and market conditions. The sets of required input data are presented, as well as the method of their reduction, processing and mutual matching, and the method of calculating the proposed characteristic parameters. Based on the analysis of their values, it is possible to assess the degree of compatibility of both PS HPP operating modes with hydrological conditions, generation from V-RES and electricity prices. As a case study, the operation of the existing PS HPP "Bajina Bašta" is considered and the procedure and results of the proposed methodology application are presented. A one-year historical period (calendar year 2023), without major repairs of this PS HPP and HPP "Bajina Bašta" and without extreme seasonal hydrological conditions, is considered. The following input data were used: hourly data on electricity generation in the PS HPP and on the energy consumed in its pumping mode, data on generation from the wind farms then existing in the balance group of the Joint Stock Company "Elektroprivreda Srbije" Belgrade (JSC EPS), relevant hydrological data, and data on realized hourly electricity prices on the "day-ahead" SEEPEX and HUPX markets and on the intraday HUPX market. Based on the results obtained by applying this methodology to the existing PS HPP "Bajina Bašta", this paper draws appropriate conclusions about the achieved degree of optimality of its operation during the period in consideration. The paper also indicates that the proposed methodology can be applied to the future PS HPP projects, with the prediction of hydrological conditions, generation from V-RES and with projections of market prices of electricity on the observed time horizon. In this way, the suitability of each possible PS HPP to the assumed physical, technical and market conditions could be assessed and, its techno-economic and financial viability could be further investigated from that point of view. In this regard, the paper announces the continuation of this research, by applying this methodology to PS HPP projects that are in the development phase or in the preparation of investment and technical documentation phase in JSC EPS, primarily to the current PS HPP project "Bistrica".

**Key words:** *Accumulation, electricity price, inflow, pump storage hydroelectric power plant, wind power plant*

## 1 UVOD

Pojava obnovljivih izvora energije (OIE) u elektroenergetici i povećanje njihovog učešća u proizvodnom miksu značajno su uticali na sigurnost i stabilnost elektroenergetskog sistema (EES), jer većina OIE (vetar i solarna energija) generišu energiju promenljivo (varijabilno). Naime, OIE jesu ekološki prihvatljivi, ali se često javlja povremena (intermitentna) proizvodnja električne energije iz njih, što otežava obezbeđivanje kontinuiranog snabdevanja električnom energijom krajnjih potrošača. Varijabilnost u proizvodnji električne energije koja se ne može dispečovati predstavlja ozbiljne izazove za planiranje rada EES sa OIE. Stoga je od suštinskog značaja poboljšanje upravljanja proizvodnjom i potrošnjom. Realizacijom određenog kapaciteta za skladištenje energije u EES može se efikasno poboljšati pouzdanost napajanja i regulisati balans potrošnje i proizvodnje, uključujući i onu iz OIE. Pošto je energija koju generišu V-OIE isprekidana, a u slučaju solarnih sistema čak se i svodi na nulu tokom noći i loših vremenskih uslova, način skladištenja energije je ključan. Danas se kao skladište energije i dalje uglavnom koristi voda pumpanjem podignuta u gornje akumulacije reverzibilnih hidroelektrana (RHE) i njena potencijalna energija neophodna za proizvodnju električne energije.

RHE sa dovoljno velikim akumulacijama mogu pomoći integraciji varijabilnih OIE (V-OIE) u EES, bilansiranju potrošnje i proizvodnje „dan unapred“ (*Day Ahead*, DA) i bilansiranju potrošnje i proizvodnje u realnom vremenu (*Real Time*, RT), generisanjem brzog odgovora. Osim intervencija u nacionalnom EES, RHE mogu učestvovati i na unutardnevnom (*Intraday*, ID) tržištu i koristiti razlike u cenama radi povećanja vrednosti sopstvene proizvedene energije. Za buduće EES RHE su ključne, zbog njihovog lakog povezivanja sa OIE i njihove sposobnosti da obezbede mnoge prednosti; podršku naponu, pomeranje opterećenja, stabilnost mreže i otpornost sistema. Uprkos ovim mogućnostima, proizvođači energije iz OIE i dalje nailaze na probleme u upravljanju električnom energijom. Da bi se rešile ove poteškoće, koriste se sofisticirane tehnike upravljanja i optimizacije, zajedno sa sistemima za upravljanje energijom, kako bi se obezbedile optimalne performanse energetskog sistema.

Optimalni raspored rada RHE dobijen je u [1] u cilju povećanja profita proizvođača električne energije, njegovim formulisanjem kao mešovitog celobrojnog problema. Urađena je matematička formulacija zadatka za hibridni EES sa solarnom elektranom, vetroelektranom i RHE, uvažavajući predviđanje cena na tržištu DA. Upoređena je ostvarena dobit u zavisnosti od toga da li je snaga RHE regulisana ili ne, korišćenjem tehnologije promenljive brzine u režimu pumpanja i evalurana je prednost te varijante. Studija [2] fokusira se na razvoj modela optimizacije za obnovljivu jedinicu, sastavljenu od vetroparka (*windfarm*, WF) i RHE, kako bi se maksimizirao njen prihod. Kombinacija ove dve tehnologije omogućava ublažavanje rizika povezanih sa varijabilnošću kako proizvodnje iz vetra, tako i cene električne energije. Problem je formulisan korišćenjem linearnog programiranja i obuhvata prodaju električne energije na Iberijskom tržištu DA i putem bilateralnog ugovora. Model je testiran i ispitan na skupovima stvarnih istorijskih podataka o proizvodnji električne energije i njenim cenama. U scenariju DA, predložena metodologija dovodi do prosečnog godišnjeg povećanja neto prihoda u rasponu između 5% i 20%. U scenariju bilateralnog ugovora, uparivanje rada WF i RHE može značajno smanjiti troškove neravnoteže proizvodnje i potrošnje. Štaviše, utvrđena je u [2] pozitivna korelacija između dimenzije akumulacije RHE, kapaciteta turbine i vrednosti prihoda. Takođe, konstatovana je tendencija smanjenja prihoda u vezi sa smanjenjem volatilnosti cena električne energije. U radu [3] realizuje se koordinisan rad jedinica RHE i termoelektričnih jedinica, razmatra promenljivost snage vetra i opterećenja i uspostavlja viševremenski model optimizacije kapaciteta RHE zasnovan na stohastičkom programiranju. Model u [3] sastoji se od unutrašnjeg i spoljašnjeg sloja. Spoljni sloj je donošenje investicionih odluka, u kome se odlučuje o alokaciji kapaciteta RHE. Unutrašnji sloj služi za donošenje odluka o optimizaciji rada sistema, koja se sprovodi u tri faze: kratkoročna optimizacija DA, ID ultra kratkoročna optimizacija i RT optimizacija. I u [3] pokazano je da je za RHE istog kapaciteta, pumpni rad sa varijabilnom brzinom bolji od pumpnog rada sa fiksnom brzinom prilikom snižavanja stope smanjenja brzine vetra. Prelaskom sa satnog obračunskog perioda u balansnom mehanizmu na 15-minutni period (sada aktuelnim u Srbiji), funkcionalnost promenljive brzine agregata RHE u pumpnom režimu rada dobija veliki značaj. Cilj [4] bio je da opiše modul koji rešava optimalni tok snage u jednom EES koji uključuje WF i RHE u vlasništvu nezavisnih proizvođača električne energije (*Independent Power Producers*, IPP) u okviru velike integracije dispečabilnih OIE. Uzimaju se u obzir dodatna fizička i ekonomska ograničenja rada za optimalan rad EES. Takođe se ispituje optimalna koordinacija rada OIE jedinica kako bi se dostigla najbolja eksploatacija OIE. Pristup sukcesivnog linearnog programiranja je korišćen u [4] za rešenje ovog problema.

Osim na nivou celine međusobno povezanog EES, koordiniran rad RHE i V-OIE može se analizirati „jedan na jedan“, kao sistem hibridne mikromreže (*Hibrid Micro Grid*, HMG), uključujući energetske objekte manje veličine/snage.

U radu [5] predlaže se sistem upravljanja energijom koji razmatra efikasnost RHE koja nelinearno varira u zavisnosti od protoka vode u režimima rada pumpa/turbina. Koristi se probabilistički pristup zasnovan na veštačkim neuronskim mrežama i na „naivnoj“ osnovi. Kroz minimiziranje nivelizovane cene energije (*Levelized Costs of Energy*, CoE), u [5] pokazana je optimalna veličina i rekonfiguracija sistema HMG, kao i optimalna količina kupljene/prodate energije. Rad [6] daje pregled nekih aplikacija i metoda u vezi sa fotonaponskim (PV) sistemom integrisanim sa malim pumpnim hidroskladišom (PHS). Prvi razmatrani slučaj bio je za stambenu zgradu, drugi u sušnom području, a treći na farmama. Ove metode ili aplikacije korišćene su za minimiziranje troškova i smanjenje emisije. Rezultati u [6] pokazali su da su upotrebom ovakvih, hibridnih PV-PHS sistema moguća smanjenja potrošnje fosilnih goriva, zavisnosti od njih, kao i operativnih troškova, u proseku od 50%. Studija [7] bavi se povećanjem efikasnosti napajanja preko hibridnog PV-PHS sistema. Korišćen je inteligentni sistem ventila koji koristi *fuzzi* logički algoritam za praćenje promena sunčevog zračenja i nivoa vode u rezervoaru. Sistem efikasno kontroliše centrifugalnu pumpu kako bi obezbedio kontinuirano snabdevanje vodom i održao konzistentnost sa potražnjom za opterećenjem. Rezultati [7] pokazuju da je *fuzzi* logički kontroler efikasno pratio promene u insolaciji i nivou vode. On može da aktivira kontrolni ventil u cilju promene smera protoka. Pored toga, lokalni kontroler uspešno je izvukao maksimalnu snagu iz PV panela, postigavši efikasnost praćenja od preko 99,5%, pojačavajući napajanje. U [8] pokazano je da je mikro-hidro skladište (MHS), korišćenjem pumpe kao turbine, potencijalno obećavajuće rešenje u određenim slučajevima; na primer, za proširenje postojećih fotonaponskih sistema (PV) i na taj način smanjenje opterećenja mreže i omogućavanje ekonomski isplative sopstvene potrošnje za proizvedenu energiju. Upotrebljen je optimizator za variranje bitnih parametara sistema, što je omogućilo određivanje optimalnog ekonomičnog rada pumpe kao turbine u kombinaciji sa PV sistemom. Ovo je zauzvrat omogućilo utvrđivanje uslova pod kojima sistem može najisplativije da funkcioniše.

Pored V-OIE, RHE se može upariti i njen rad koordinisati i sa drugim energetske objektima, uključujući različite druge tipove skladišta. Tako publikacija [9] ispituje koordiniran rad RHE i baterijskog sistema za skladištenje energije (*Battery Energy Storage System*, BESS) radi poboljšanja profitabilnosti. Dok RHE nude veliki kapacitet skladištenja, ali imaju sporije vreme odziva na promene snage u EES, BESS-ovi imaju manji kapacitet, ali brže vreme odziva. Hibridni sistem koji kombinuje oba kapaciteta može na taj način iskoristiti njihovu sinergiju. Model linearnog mešovito celobrojnog programiranja razvijen je u [9]. Po tom modelu, RHE radi na spot tržištu i obezbeđuje automatsku rezervu za obnavljanje frekvencije, dok BESS obezbeđuje rezervu za zadržavanje frekvencije. Rezultati [9] pokazuju povećanje prihoda od 10,05% kroz koordinaciju rada RHE i BESS, u poređenju sa nezavisnim radom oba sistema skladištenja.

U radu [10] predstavljen je optimizacioni model ograničen neuronskom mrežom za optimalno planiranje rada RHE. Neuronske mreže su obučene oflajn, da bi shvatile složene krive performansi u režimima pumpe i turbine, koristeći stvarne radne podatke. Obučeni modeli se zatim ugrađuju u okvir optimizacije koji daje optimalno i fizički usaglašeno planiranje na tržištu energije DA i na tržištu rezervi, za RHE. Rezultati [10] pokazuju sposobnost neuronskih mreža da bolje vode model optimizacije, što dovodi do većeg profita, uz zadržavanje prihvatljivog vremena rešavanja problema, posebno kada se koristi smanjenje njegove težine/dimenzionalnosti. Konkretno, rezultati u [10] pokazali su da je tačno „hvatanje“ nelinearnih karakteristika RHE ključno za obezbeđenje pouzdanih rezervi za EES.

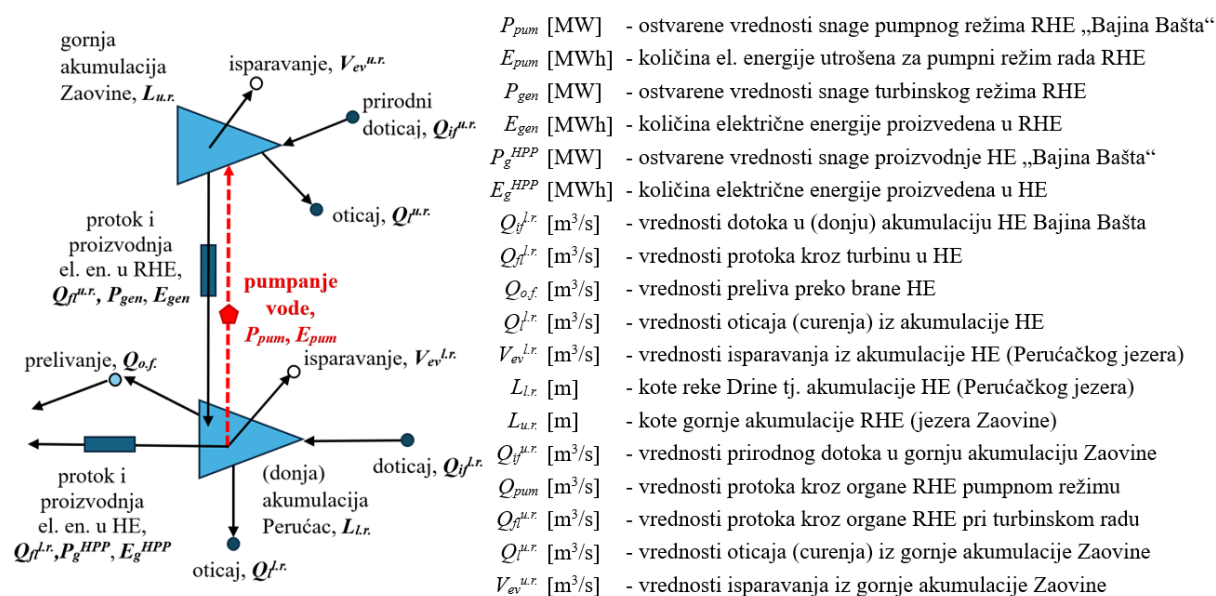
U ovom radu smo takođe koristili realno zabeležene, istorijske podatke o angažovanju RHE, proizvodnji iz vetroelektrana (VE), potrošnji konzuma, hidrološke podatke i podatke o cenama električne energije DA i ID, ostvarenih na berzama SEEPEX i HUPLEX. Ciljevi sprovedenog istraživanja bili su kreiranje i primena metodologije za proveru vremenske usklađenosti rada postojeće RHE u EES Srbije sa tehničkim, hidrološkim i tržišnim prilikama. U tu svrhu osmišljeni su i uvedeni koeficijenti koincidencije (faktori korelacije) generatorskog i pumpnog režima rada RHE, respektivno, i ostalih relevantnih veličina. Predložena metodologija, ovde opisana u Poglavlju 2, jednako bi mogla da se koristi i za simulacije tj. određivanje onih periodâ i režimâ rada postojećih i budućih RHE u kojima bi njihovo angažovanje bilo optimalno ili blisko optimalnom. U Poglavlju 3 izloženi su rezultati proračuna metodologijom definisanih faktora korelacije, na primeru RHE „Bajina Bašta“ i ilustrovana je kompatibilnost njenog angažovanja, tokom izabranog jednogodišnjeg perioda, sa proizvodnjom iz VE, potrošnjom, hidrološkim prilikama i cenama električne energije. Rezultati su uglavnom predstavljeni grafički jer na taj način direktno, vizuelno pokazuju u kojoj meri su oba režima rada RHE, respektivno, bila usklađena sa prilikama u kojima su zabeleženi. Na kraju rada su izloženi odgovarajući Zaključci.

## 2 METODOLOGIJA PRIMENJENA U ISTRAŽIVANJU

### 2.1 Hidrološka šema i bilansi vodnog resursa

Za opis predložene i primenjene metodologije poći ćemo od hidrološke šeme za odabranu studiju slučaja – sistema HE i RHE „Bajina Bašta“, koja je ilustrovana na Slici 1.

U daljim proračunima su vrednosti  $P_{pum}$  i  $E_{pum}$  uglavnom uzimane sa negativnim predznakom, kako bi se na taj način pocrtalo da je reč o potrošnji električne energije. Posledično, kod grafičkih rezultata proračuna prikazanih u Potpoglavlju 3.4, parametri koji se odnose na pumpni režim RHE prikazani su ispod apscise, a oni koji se odnose na generatorski režim RHE, iznad nje.



Slika 1: Hidrološka šema sistema HE i RHE Bajina Bašta

Prema hidrološkoj šemi sa Slike 1, za svaki posmatrani vremenski interval  $\Delta t$  moguće je utvrditi bilanse primarnog resursa (vode), u [m<sup>3</sup>], za gornju i donju akumulaciju, respektivno.

Uz zanemarene gubitke u cevovodu, tj. odsustvo njihovog zasebnog prikazivanja (možemo smatrati da su oni uračunati u  $Q_{pum}$  i  $Q_{fl}^{u.r.}$ ), jednačina bilansa za ceo sistem HE i RHE „Bajina Bašta“ je:

$$Q_{if}^{l.r.} = Q_{fl}^{l.r.} + Q_{o.f.} + Q_l^{l.r.} + V_{ev}^{l.r.} + Q_l^{u.r.} + V_{ev}^{u.r.} - Q_{if}^{u.r.}. \quad (1)$$

Odgovarajuće zapremine iz (1) predstavljaju funkcionalne činioce sledećih električnih snaga, odnosno utrošene i proizvedenih količina energije:  $E_{pum} = f_1(Q_{pum})$ ,  $E_{gen} = f_2(Q_{fl}^{u.r.})$  i  $E_g^{HPP} = f_3(Q_{fl}^{l.r.})$ . U cilju sprovođenja ovog istraživanja bilo je potrebno prikupiti ove podatke i upariti ih s ostalim relevantnim podacima (hidrološkim i tržišnim) i analizirati. Za neophodne proračune, u (1) grupisani su i nadalje zajednički posmatrani, u svakom satu, bilansi dotoka, protoka i preliva na HE (bilans vodnog resursa na donjoj akumulaciji, bez rada RHE):

$$\Delta Q_{l.r.} = Q_{if}^{l.r.} - Q_{fl}^{l.r.} - Q_{o.f.} \quad (2)$$

S obzirom da se prelivi,  $Q_{o.f.}$ , na pribranskoj HE uz donju akumulaciju javljaju sporadično (diskretno), najčešće u periodima izrazito velikih dotoka u nju, oni su u ovoj analizi tretirani i zasebno, kako bi se ocenila vremenska usklađenost režima rada RHE i sa tim, pojedinačnim, događajima.

U odnosu na hidrološku šemu sa Slike 1 i bilans (1), za potrebe ovog istraživanja zanemareni su oticaji i isparavanja iz gornje i donje akumulacije ( $Q_l^{u.r.}$ ,  $V_{ev}^{u.r.}$ ,  $Q_l^{l.r.}$  i  $V_{ev}^{l.r.}$ ). Navedeni preostali podaci koriste se u setovima za isti vremenski period. Za analizu studije slučaja odabrana je kalendarska 2023. godina, zbog uglavnom prosečnih uslova. Tokom nje je hidrologija bila nešto iznad prosečne, ali nije bilo kapitalnih remonata niti revitalizacija HE i RHE „Bajina Bašta“ (za RHE to je bio slučaj tokom 2024.). Ranije godine nisu mogle biti odabrane zbog netipičnih ostalih okolnosti (npr. 2021. i 2022. zbog ekstremnih hidroloških prilika).

## 2.2 Ulazni podaci

Za ovo istraživanje korišćeni su i na vremenskoj osi uparivani istorijski podaci prikazani u Tabeli I. U njoj su prikazane i vrednosti ovih podataka koje su, prema ovde predloženoj metodologiji, u daljim proračunima korišćene za normalizaciju ovih ulaznih veličina. Za svaki set (tj. vrstu) podataka utvrđena je raspoloživa rezolucija (periodičnost uzorkovanja podataka), kako je to takođe prikazano u Tabeli I, za analizirani slučaj postojeće RHE.

Tabela I: Pregled potrebnih ulaznih podataka, njihovih raspoloživih rezolucija, periodâ svođenja i vrednosti korišćenih za njihovu normalizaciju

| <i>Veličina</i>                                                                                            | <i>Ozn.</i>     | <i>Jedin.</i> | <i>Rezolucija</i> | <i>Svođenje</i> | <i>Vr. za norm.</i>   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| Ostvarene satne energije pumpnog režima RHE „Bajina Bašta“                                                 | $E_{pum}$       | MWh           | 1 sat             | -               | maks. snaga pumpanja  |
| Ostvarene satne količine el. en. proizvedene u RHE „B. Bašta“                                              | $E_{gen}$       | MWh           | 1 sat             | -               | maks. snaga turbinir. |
| Sumarne satne količine električne energije koja je proizvedena iz vetrogeneratora u balansnoj grupi EPS AD | $\Sigma E_{WF}$ | MWh           | 1 sat             | -               | srednja               |
| Utrošene satne količine el. energ. konzuma Srbije (bez KiM)                                                | $E_c$           | MWh           | 1 sat             | -               | srednja               |

| <i>Veličina</i>                                                  | <i>Ozn.</i>     | <i>Jedin.</i>     | <i>Rezolucija</i> | <i>Svođenje</i>                     | <i>Vr. za norm.</i>                                                        |
|------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Kote reke Drine tj. akumulacije HE „B. Bašta“ (Perućačkog jez.)  | $L_{l.r.}$      | m                 | 6 sati            | na 1 sat, interpolacijom            | srednja                                                                    |
| Dotoci u akumulaciju HE „B. Bašta“                               | $Q_{ij}^{l.r.}$ | m <sup>3</sup> /s | 6 sati            | na 1 sat, interpolacijom            | Bilans, $\Delta Q_{l.r.}$ : ekstremne (minim./maksim.); srednja $Q_{o.f.}$ |
| Protoci u HE „Bajina Bašta“                                      | $Q_{fl}^{l.r.}$ | m <sup>3</sup> /s | 6 sati            | na 1 sat, interpolacijom            |                                                                            |
| Prelivi na brani HE „B. Bašta“                                   | $Q_{o.f.}$      | m <sup>3</sup> /s | neperiod.         | nema svođenja, uzimaju se diskretno |                                                                            |
| Stanja gornje akumulacije RHE, energet. vrednosti jezera Zaovine | $E_{u.r.}$      | GWh               | 1 dan             | na 1 sat, interpolacijom            | minim. / maksim.                                                           |
| Satne cene el. energije na tržištu „dan unapred“ SEEPEX          | $p_{da}^{SP}$   | €/MWh             | 1 sat             | -                                   | srednja                                                                    |
| Satne cene el. energije na tržištu „dan unapred“ HUPX            | $p_{da}^{HP}$   | €/MWh             | 1 sat             | -                                   | srednja                                                                    |
| Satne cene el. energije na unutardnevnom tržištu HUPX            | $p_{id}^{HP}$   | €/MWh             | 1 sat             | -                                   | srednja                                                                    |

S obzirom da nisu bili poznati podaci o snagama pumpanja u RHE i snagama proizvodnje u HE, RHE i VE, a jesu bile satne vrednosti električne energije proizvedene u njima (za RHE:  $E_{gen}$ ), i one utrošene u pumpnom režimu RHE,  $E_{pum}$ , karakteristični parametri su sračunati na osnovu srednje vrednosti snage proizvodnje i snage pumpanja, u svakom satu. U slučaju rada RHE „Bajina Bašta“ tokom odabrane, 2023. godine, bilo je sati tokom kojih je RHE prelazila iz pumpnog režima rada u generatorski, i obrnuto, pa su se za isti sat javljali i podaci za  $E_{pum}$  i za  $E_{gen}$ .

## 2.3 Obrada ulaznih podataka – svođenje, normalizacija i uparivanje

S obzirom da većina potrebnih ulaznih podataka za studiju slučaja ima rezoluciju od 1 sata, sve ostale, periodično merene, veličine svedene su na tu rezoluciju. Kako je rezolucija merenja tih veličina bila veća od 1 sata, to je svođenje tih ulaznih podataka na satnu rezoluciju urađeno interpolacijom vrednosti, do kojih se došlo segmentnom linearizacijom (između svaka dva susedna, registrovana podatka). Ova linearizacija predstavlja više nego zadovoljavajuću aproksimaciju kada je reč o dotocima i protocima na donjoj akumulaciji,  $Q_{ij}^{l.r.}$  i  $Q_{fl}^{l.r.}$ , kao i o njenoj koti,  $L_{l.r.}$ , dok je za stanja gornje akumulacije,  $E_{u.r.}$ , ona samo približna, ali sasvim dovoljne tačnosti za ovde izvršene proračune i analize dobijenih rezultata.

Apsolutne vrednosti registrovanih ulaznih podataka ili njihove svedene vrednosti (na odabranu, jednosatnu rezoluciju) svedene su potom na relativne jedinice (r.j. tj. *p.u.* – *per unit*), deljenjem stvarno registrovane vrednosti sa srednjom (godišnjom), nominalnom, minimalnom ili maksimalnom vrednošću te veličine, u zavisnosti od slučaja ili potrebe, shodno Tabeli I. Dakle, pre sračunavanja parametara karakterističnih za analizu kompatibilnosti pogona RHE sa hidrološkim, tehničkim i tržišnim prilikama, ulazni podaci navedeni u Tabeli I normalizovani su (izraženi su u relativnim jedinicama, [r.j.]), na način kako sledi.

$$\text{Energija utrošena na pumpanje:} \quad e_{pum}(t) = \frac{E_{pum}(t)}{p_p^{Max.1h}} \quad (3)$$

$$\text{Energija proizvedena u RHE:} \quad e_{gen}(t) = \frac{E_{gen}(t)}{p_g^{Max.1h}} \quad (4)$$

$$\text{Bilans na donjoj akumulaciji (bez RHE):} \quad \Delta q_{l.r.}^M(t) = \frac{\Delta Q_{l.r.}(t)}{\Delta Q_{l.r.}^{Max}} \quad \text{za } \Delta Q_{l.r.} > 0 \quad (5)$$

$$\Delta q_{l.r.}^m(t) = \frac{\Delta Q_{l.r.}(t)}{\Delta Q_{l.r.}^{min}} \quad \text{za } \Delta Q_{l.r.} < 0 \quad (6)$$

Preliv donje akumulacije:  $q_{o.f.}(t) = \frac{Q_{o.f.}(t)}{Q_{o.f.}^{av}} \quad (7)$

Kota donje akumulacije:  $l_{l.r.}(t) = \frac{L_{l.r.}(t)}{L_{l.r.}^{av}} \quad (8)$

Stanje gornje akumulacije:  $e_{u.r.}^m(t) = \frac{E_{u.r.}(t)}{E_{u.r.}^{min}}, \text{ za pumpni režim RHE} \quad (9)$

$$e_{u.r.}^M(t) = \frac{E_{u.r.}(t)}{E_{u.r.}^{Max}}, \text{ za turbinski režim RHE} \quad (10)$$

Energija proizvedena u vetrogeneratorima:  $\sum e_{WF}(t) = \frac{\sum E_{WF}(t)}{\sum E_{WF}^{av}} \quad (11)$

Utrošena električna energija konzuma:  $e_c(t) = \frac{E_c(t)}{E_c^{av}} \quad (12)$

Cena el. en. na Day Ahead SEEPEX:  $p_{da}^{SP}(t) = \frac{SP_{da}(t)}{SP_{da}^{av}} \quad (13)$

Cena el. en. na Day Ahead HUPX:  $p_{da}^{HP}(t) = \frac{HP_{da}(t)}{HP_{da}^{av}} \quad (14)$

Cena el. en. na IntraDay HUPX:  $p_{id}^{HP}(t) = \frac{HP_{id}(t)}{HP_{id}^{av}} \quad (15)$

Da bi se i vizuelno ilustrovala podudarnost (kompatibilnost) režima rada RHE sa ostalim ulaznim veličinama od značaja, normalizovane satne vrednosti energije utrošene za pumpanje u RHE, (3), i energije proizvedene u RHE, (4), respektivno su uparivane, redom, sa normalizovanim satnim vrednostima (ili na satne vrednosti svedenim) ostalim ulaznim parametrima, (5) – (15). Uparivanje je izvršeno prema šemi datoj u Tabeli II.

Tabela II: Šema uparivanja normalizovanih vrednosti ulaznih podataka

|              | $\Delta q_{l.r.}$ | $q_{o.f.}(t)$ | $l_{l.r.}(t)$ | $e_{u.r.}^m(t)$ | $e_{u.r.}^M(t)$ | $\sum e_{WF}(t)$ | $e_c(t)$ | $p_{da}^{SP}(t)$ | $p_{da}^{HP}(t)$ | $p_{id}^{HP}(t)$ |
|--------------|-------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------|----------|------------------|------------------|------------------|
| $e_{pum}(t)$ | ×                 | ×             | ×             | ×               | ×               | 1, 2, 3, →       | ←        | 1                | 2                | 3                |
| $e_{gen}(t)$ | ×                 | ×             | ×             | ×               | ×               | 1, 2, 3, →       | ←        | 1                | 2                | 3                |

U Tabeli II oznake u poljima imaju sledeće značenje:

- ×
  - 
  - ←
  - 1, 2, 3
- uparivanje „jedan na jedan“;  
– uparivanje tri ulazne veličine, uključuje i veličinu iz susedne kolone desno;  
– uparivanje identično prethodnom, uključuje i veličinu iz susedne kolone levo;  
1, 2, 3 – tri sukcesivna uparivanja po dve stalne veličine i jedne promenljive (koje su označene 1 do 3).

Šema uparivanja iz Tabele II primenjena je dva puta, na dva različita načina:

- hronološki, tako što su sve uparene veličine posmatrane redom, od prvog sata 1.1.2023. do 31.12.2023 u 23.59.59 č.;
- prema opadajuće uređenim dijagramima veličina iz zaglavlja kolona Tabele II, svih osim  $\sum e_{WF}(t)$ .



Grafički rezultati uparivanja najvažnijih veličina prikazani su u potpoglavljima 3.1 do 3.3.

## 2.4 Proračuni karakterističnih parametara kompatibilnosti pogona RHE

Nakon normalizovanja ulaznih podataka, karakteristični parametri kompatibilnosti pumpnog i turbinskog režima rada RHE (koeficijenti koincidencije tj. faktori korelacije sa ostalim veličinama / uslovima respektivno – hidrološkim, tehničkim, tržišnim), određeni su kao bezdimenzione veličine, pojedinačnim množenjem izraza (3) i (4) respektivno, izrazima (5) do (15). Vizuelni pregled ovih koeficijenata, iz koga se može videti kojih se veličina koincidencija utvrđuje, dat je u Tabeli III, dok su njihovi nazivi, oznake i formule za izračunavanje navedeni u Tabeli IV.

Tabela III: Matrični pregled generisanja faktora korelacije režima rada RHE

| [p.u.]            | $e_{pum}$                             | $e_{gen}$                             | $\Sigma e_{WF}$                                    | $e_c$                                              |
|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| $\Delta q_{l.r.}$ | $k_{p \leftrightarrow \Delta q}^{lr}$ | $k_{g \leftrightarrow \Delta q}^{lr}$ |                                                    |                                                    |
| $l_{l.r.}$        | $k_{p \leftrightarrow l}^{lr}$        | $k_{g \leftrightarrow l}^{lr}$        |                                                    |                                                    |
| $q_{o.f.}$        | $k_{p \leftrightarrow q}^{of}$        | $k_{g \leftrightarrow q}^{of}$        |                                                    |                                                    |
| $e_{u.r.}$        | $k_{p \leftrightarrow e}^{ur}$        | $k_{g \leftrightarrow e}^{ur}$        |                                                    |                                                    |
| $e_{pum}$         |                                       |                                       | $k_{p \leftrightarrow g}^{wf \leftrightarrow e_c}$ |                                                    |
| $e_{gen}$         |                                       |                                       | $k_{g \leftrightarrow p}^{wf \leftrightarrow e_c}$ |                                                    |
| $\Sigma e_{WF}$   | $k_{p \leftrightarrow g}^{wf}$        | $k_{g \leftrightarrow p}^{wf}$        |                                                    | $k_{g \leftrightarrow p}^{wf \leftrightarrow e_c}$ |
| $e_c$             | $k_{p \leftrightarrow e_c}$           | $k_{g \leftrightarrow e_c}$           |                                                    |                                                    |
| $p_{da}^{SP}$     | $k_{p \leftrightarrow p}^{SPda}$      | $k_{g \leftrightarrow p}^{SPda}$      |                                                    |                                                    |
| $p_{da}^{HP}$     | $k_{p \leftrightarrow p}^{HPda}$      | $k_{g \leftrightarrow p}^{HPda}$      |                                                    |                                                    |
| $p_{ld}^{HP}$     | $k_{p \leftrightarrow p}^{HPld}$      | $k_{g \leftrightarrow p}^{HPld}$      |                                                    |                                                    |

Rezultati proračuna ovde uvedenih karakterističnih parametara kompatibilnosti režima rada RHE, za razmotrenu studiju slučaja, obrađeni su takođe na dva načina; hronološki i u vidu uređenih dijagrama svojih vrednosti. Ovi potonji prikazani su u Potpoglavlju 3.4.

## 3 REZULTATI PRIMENE METODOLOGIJE NA STUDIJU SLUČAJA

U nastavku su dati grafički prikazi odabranih, najvažnijih rezultata primene opisane metodologije. Slede vizuelne ilustracije poklapanja (kompatibilnosti) turbinskog i pumpnog režima rada RHE s ostalim, najvažnijim ulaznim podacima od značaja. Takođe grafički prikazane su i vrednosti napred predloženih parametara, koje su sračunate na način opisan u ovom radu. Grafici su kreirani a parametri sračunati na osnovu ulaznih podataka za studiju slučaja – angažovanje RHE „Bajina Bašta“ tokom kalendarske 2023. godine.

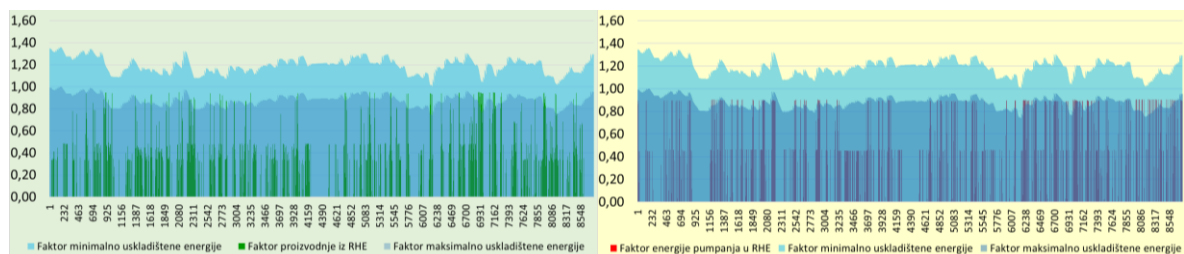
Tabela IV: Faktori korelacije režima rada RHE; nazivi, oznake i formule za izračunavanje

| Naziv parametra                                                                                                          | Oznaka                                | Formula za izračunavanje                                                                                                            |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Koeficijent korelacije pumpnog režima rada RHE sa bilansom dotoka, protoka i preliva na HE (na donjoj akumulaciji)       | $k_{p \leftrightarrow \Delta q}^{lr}$ | $k_{p \leftrightarrow \Delta q}^{lr} = \frac{E_{pum}(t) \cdot \Delta Q_{l.r.}(t)}{P_p^{Max} \cdot \Delta Q_{l.r.}^{ext} \cdot 1 h}$ | (16) |
| Koeficijent korelacije generatorskog režima rada RHE sa bilansom dotoka, protoka i preliva na HE (na donjoj akumulaciji) | $k_{g \leftrightarrow \Delta q}^{lr}$ | $k_{g \leftrightarrow \Delta q}^{lr} = \frac{E_{gen}(t) \cdot \Delta Q_{l.r.}(t)}{P_g^{Max} \cdot Q_{l.r.}^{ext} \cdot 1 h}$        | (17) |
| Koeficijent korelacije pumpnog režima i kote donje akumulacije                                                           | $k_{p \leftrightarrow L}^{lr}$        | $k_{p \leftrightarrow L}^{lr} = \frac{E_{pum}(t) \cdot L_{lr}(t)}{P_p^{Max} \cdot L_{l.r.}^{av} \cdot 1 h}$                         | (18) |
| Koeficijent korelacije generatorskog režima i kote donje akumulacije                                                     | $k_{g \leftrightarrow L}^{lr}$        | $k_{g \leftrightarrow L}^{lr} = \frac{E_{gen}(t) \cdot L_{lr}(t)}{P_g^{Max} \cdot L_{l.r.}^{av} \cdot 1 h}$                         | (19) |
| Koeficijent korelacije pumpnog režima sa prosečnom vrednošću preliva na HE (donjoj akumulaciji)                          | $k_{p \leftrightarrow q}^{o.f.}$      | $k_{p \leftrightarrow q}^{o.f.} = \frac{E_{pum}(t) \cdot Q_{o.f.}(t)}{P_p^{Max} \cdot Q_{o.f.}^{av} \cdot 1 h}$                     | (20) |
| Koeficijent korelacije generatorskog režima RHE sa prosečnom vrednošću preliva na HE (donjoj akumulaciji)                | $k_{g \leftrightarrow q}^{o.f.}$      | $k_{g \leftrightarrow q}^{o.f.} = \frac{E_{gen}(t) \cdot Q_{o.f.}(t)}{P_g^{Max} \cdot Q_{o.f.}^{av} \cdot 1 h}$                     | (21) |

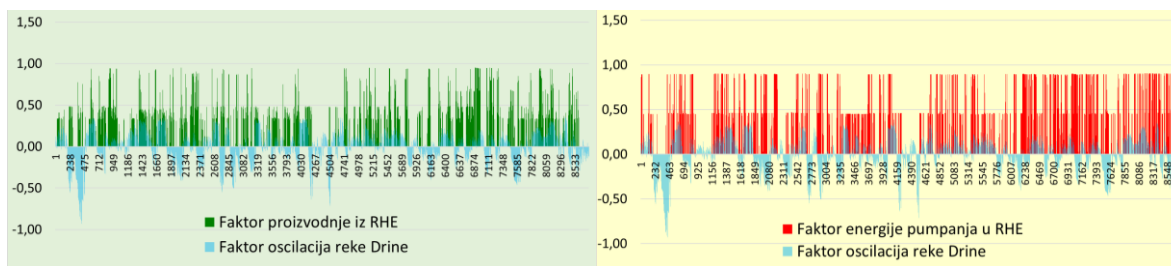
| Naziv parametra                                                                                                                                              | Oznaka                                            | Formula za izračunavanje                                                                                                                                               |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Koeficijent korelacije pumpnog režima i stanja gornje akumulacije                                                                                            | $k_{p \leftrightarrow e}^{ur}$                    | $k_{p \leftrightarrow e}^{ur} = \frac{E_{pum}(t) \cdot E_{u.r.}(t)}{P_p^{Max} \cdot E_{u.r.}^{min} \cdot 1 h}$                                                         | (22) |
| Koeficijent korelacije generatorskog režima RHE i stanja gornje akumulacije                                                                                  | $k_{g \leftrightarrow e}^{ur}$                    | $k_{g \leftrightarrow e}^{ur} = \frac{E_{gen}(t) \cdot E_{u.r.}(t)}{P_g^{Max} \cdot E_{u.r.}^{Max} \cdot 1 h}$                                                         | (23) |
| Koeficijent korelacije pumpnog režima RHE i srednje godišnje vrednosti energije satne proizvodnje iz vetrogeneratora                                         | $k_{p \leftrightarrow g}^{WF}$                    | $k_{p \leftrightarrow g}^{WF} = \frac{E_{pum}(t) \cdot \Sigma E_{WF}(t)}{P_p^{Max} \cdot \Sigma E_{WF}^{av} \cdot 1 h}$                                                | (24) |
| Koeficijent korelacije pumpnog režima RHE sa srednjom godišnjom vrednošću energije satne proizvodnje iz vetrogeneratora i sa satnom potrošnjom konzuma       | $k_{p \leftrightarrow g}^{WF \leftrightarrow Ec}$ | $k_{p \leftrightarrow g}^{WF \leftrightarrow Ec} = \frac{E_{pum}(t) \cdot \Sigma E_{WF}(t) \cdot E_c(t)}{P_p^{Max} \cdot \Sigma E_{WF}^{av} \cdot E_c^{av} \cdot 1 h}$ | (25) |
| Koeficijent korelacije generatorskog režima RHE i srednje godišnje vrednosti energije satne proizvodnje vetrogeneratora                                      | $k_{g \leftrightarrow g}^{WF}$                    | $k_{g \leftrightarrow g}^{WF} = \frac{E_{gen}(t) \cdot \Sigma E_{WF}(t)}{P_g^{Max} \cdot \Sigma E_{WF}^{av} \cdot 1 h}$                                                | (26) |
| Koeficijent korelacije generatorskog režima RHE sa srednjom godišnjom vrednošću energije satne proizvodnje iz vetrogeneratora i sa satnom potrošnjom konzuma | $k_{g \leftrightarrow g}^{WF \leftrightarrow Ec}$ | $k_{g \leftrightarrow g}^{WF \leftrightarrow Ec} = \frac{E_{gen}(t) \cdot \Sigma E_{WF}(t) \cdot E_c(t)}{P_g^{Max} \cdot \Sigma E_{WF}^{av} \cdot E_c^{av} \cdot 1 h}$ | (27) |
| Koeficijent korelacije pumpnog režima RHE i prosečne godišnje cene električne energije na tržištu „dan unapred“ SEEPEX                                       | $k_{p \leftrightarrow p}^{SPda}$                  | $k_{p \leftrightarrow p}^{SPda} = \frac{E_{pum}(t) \cdot SP_{da}(t)}{P_p^{Max} \cdot SP_{da}^{av} \cdot 1 h}$                                                          | (28) |
| Koeficijent korelacije pumpnog režima RHE i prosečne godišnje cene električne energije na tržištu „dan unapred“ HUPEX                                        | $k_{p \leftrightarrow p}^{HPda}$                  | $k_{p \leftrightarrow p}^{HPda} = \frac{E_{pum}(t) \cdot HP_{da}(t)}{P_p^{Max} \cdot HP_{da}^{av} \cdot 1 h}$                                                          | (29) |
| Koeficijent korelacije satne energije proizvedene u RHE i prosečne godišnje cene električne energije na tržištu „dan unapred“ SEEPEX                         | $k_{g \leftrightarrow p}^{SPda}$                  | $k_{g \leftrightarrow p}^{SPda} = \frac{E_{gen}(t) \cdot SP_{da}(t)}{P_g^{Max} \cdot SP_{da}^{av} \cdot 1 h}$                                                          | (30) |
| Koeficijent korelacije satne energije proizvedene u RHE i prosečne godišnje cene električne energije na tržištu „dan unapred“ HUPEX                          | $k_{g \leftrightarrow p}^{HPda}$                  | $k_{g \leftrightarrow p}^{HPda} = \frac{E_{gen}(t) \cdot HP_{da}(t)}{P_g^{Max} \cdot HP_{da}^{av} \cdot 1 h}$                                                          | (31) |
| Koeficijent korelacije pumpnog režima RHE i prosečne godišnje cene električne energije na unutardnevnom tržištu HUPEX                                        | $k_{p \leftrightarrow p}^{HPid}$                  | $k_{p \leftrightarrow p}^{HPid} = \frac{E_{pum}(t) \cdot HP_{id}(t)}{P_p^{Max} \cdot HP_{id}^{av} \cdot 1 h}$                                                          | (32) |
| Koeficijent korelacije satne energije proizvedene u RHE i prosečne godišnje cene električne energije na unutardnevnom tržištu HUPEX                          | $k_{g \leftrightarrow p}^{HPid}$                  | $k_{g \leftrightarrow p}^{HPid} = \frac{E_{gen}(t) \cdot HP_{id}(t)}{P_g^{Max} \cdot HP_{id}^{av} \cdot 1 h}$                                                          | (33) |

### 3.1 Dijagrami poklapanja (kompatibilnosti) režima rada RHE sa hidrološkim prilikama

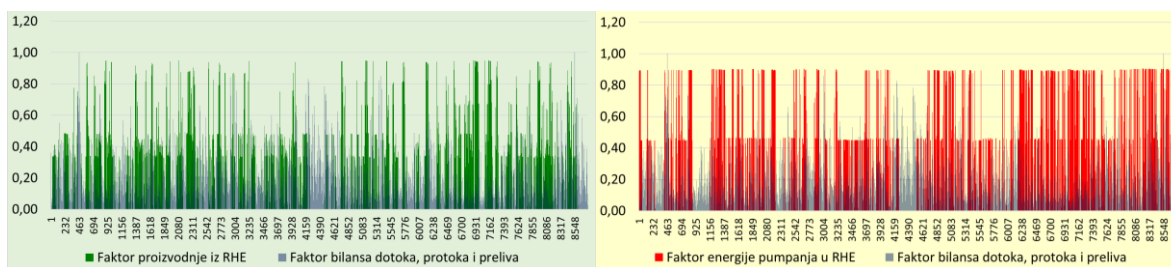
#### 3.1.1 Hronološki dijagrami kompatibilnosti RHE sa hidrološkim prilikama



Slika 2: Hronološko preklapanje generatorskog (levo) i pumpnog (desno) režima rada RHE i faktorâ minimalno i maksimalno uskladištene energije u gornjoj akumulaciji

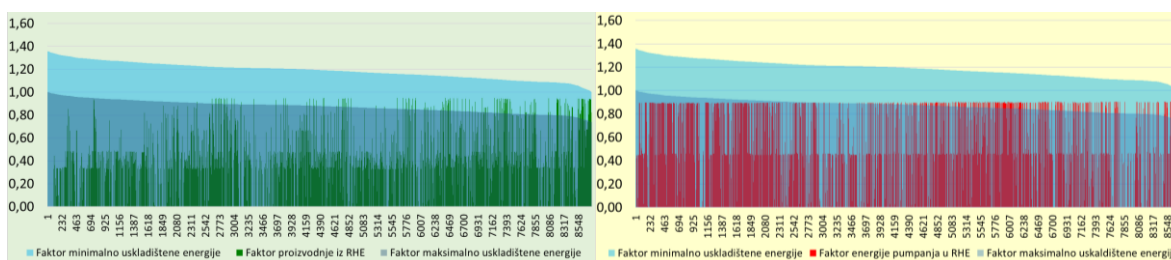


Slika 3: Hronološko poklapanje generatorskog (levo) i pumpnog (desno) režima rada RHE sa faktorom oscilacija kote reke Drine (donje akumulacije)

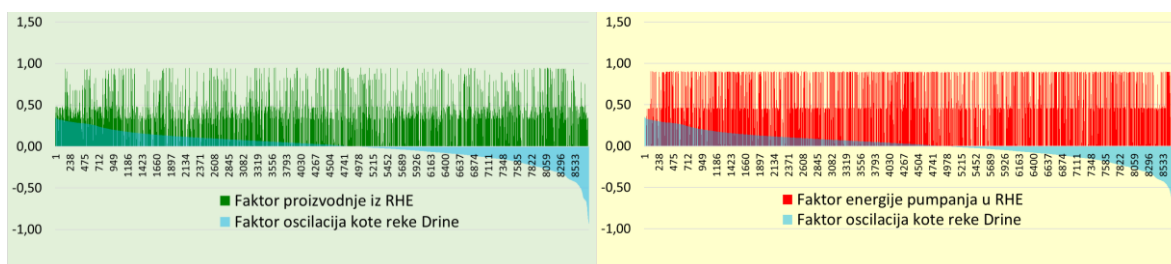


Slika 4: Hronološko poklapanje generatorskog (levo) i pumpnog (desno) režima rada RHE sa faktorom bilansa dotoka, protoka i preliva na HE „Bajina Bašta“

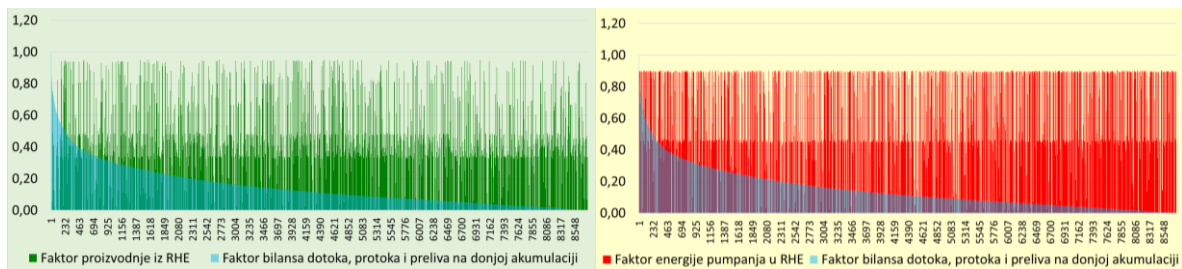
### 3.1.2 Dijagrami kompatibilnosti RHE prema uređenim dijagramima hidroloških veličina



Slika 5: Poklapanje generatorskog (levo) i pumpnog (desno) režima rada RHE sa opadajućim vrednostima faktorâ minimalno i maksimalno uskladištene energije u gornjoj akumulaciji



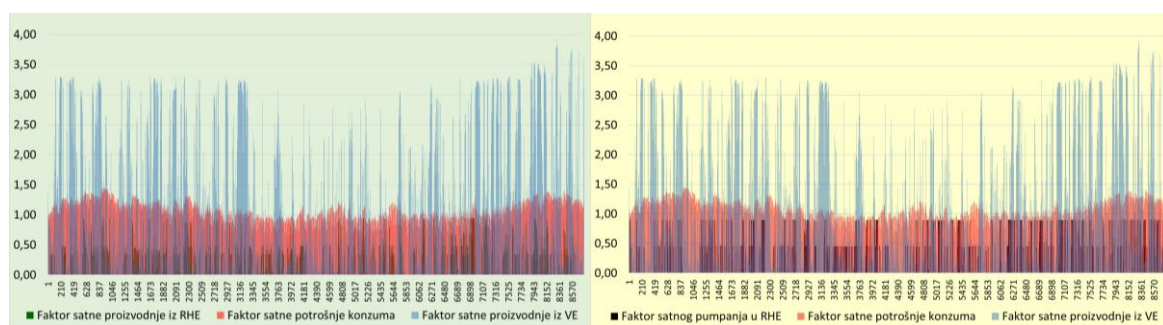
Slika 6: Poklapanje generatorskog (levo) i pumpnog (desno) režima rada RHE s opadajućim vrednostima faktora oscilacija kote reke Drine



Slika 7: Poklapanje generatorskog (levo) i pumpnog (desno) režima rada RHE s opadajućim vrednostima faktora bilansa dotoka, protoka i preliva

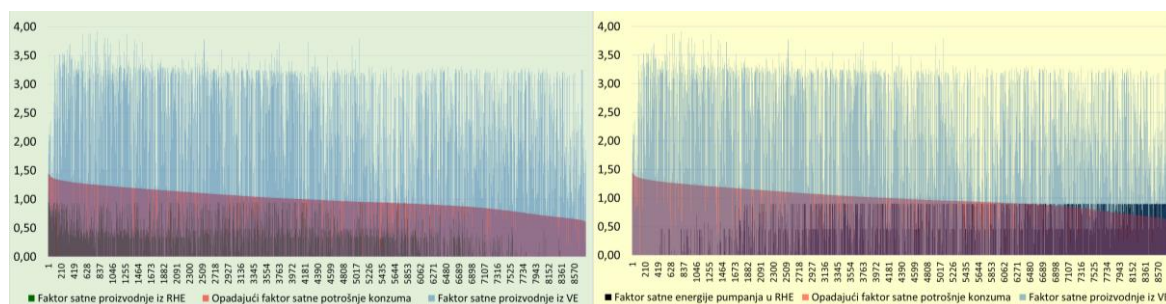
### 3.2 Dijagrami poklapanja (kompatibilnosti) režima rada RHE sa proizvodnjom iz vetroelektrana u balansnoj grupi EPS AD i sa potrošnjom konzuma

#### 3.2.1 Hronološki dijagrami kompatibilnosti RHE sa proizvodnjom VE i potrošnjom



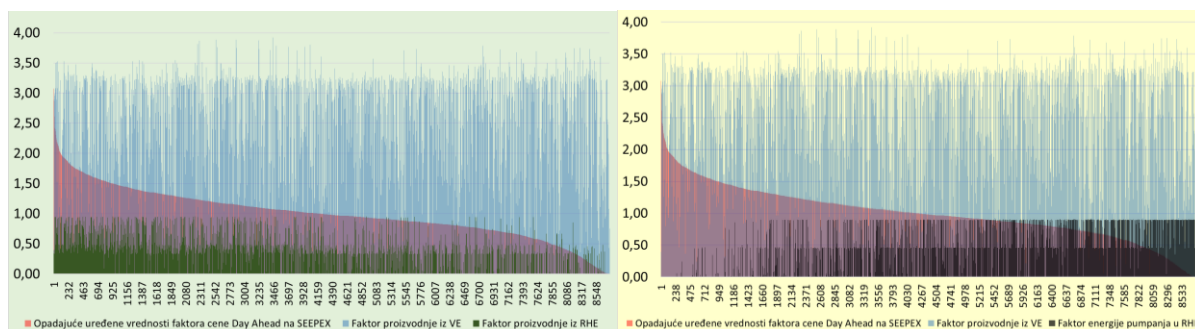
Slika 8: Hronološko poklapanje generatorskog (levo) i pumpnog (desno) režima rada RHE sa proizvodnjom iz VE i satnom potrošnjom konzuma

#### 3.2.2 Dijagrami kompatibilnosti RHE i proizvodnje iz VE u odnosu na uređene opadajuće dijagrame satne potrošnje konzuma

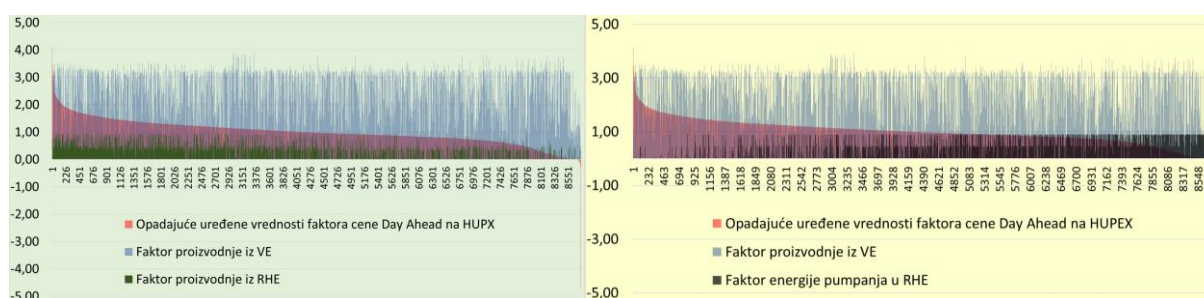


Slika 9: Poklapanje generatorskog (levo) i pumpnog (desno) režima rada RHE i proizvodnje iz VE sa opadajuće uređenom satnom potrošnjom konzuma

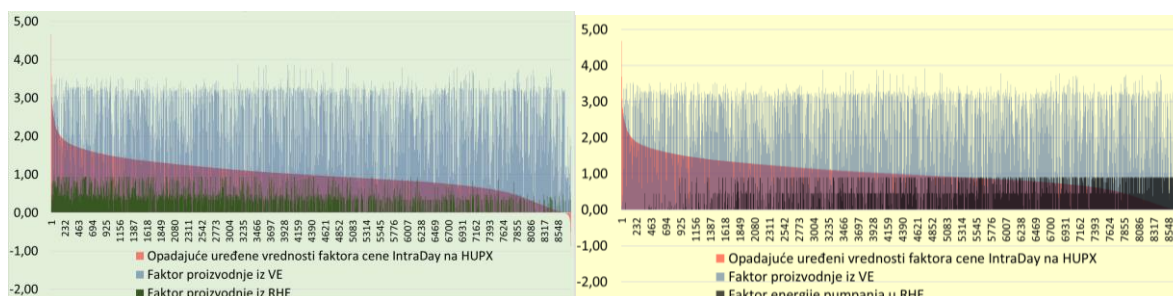
### 3.3 Dijagrami poklapanja (kompatibilnosti) režima rada RHE i proizvodnje iz VE prema uređenim dijagramima tržišnih cena električne energije



Slika 10: Poklapanje generatorskog (levo) i pumpnog (desno) režima rada RHE i proizvodnje iz vetroelektrana sa opadajućim cenama Day Ahead na SEEPEX



Slika 11: Poklapanje generatorskog (levo) i pumpnog (desno) režima rada RHE i proizvodnje iz vetroelektrana sa opadajućim cenama Day Ahead na HUPX



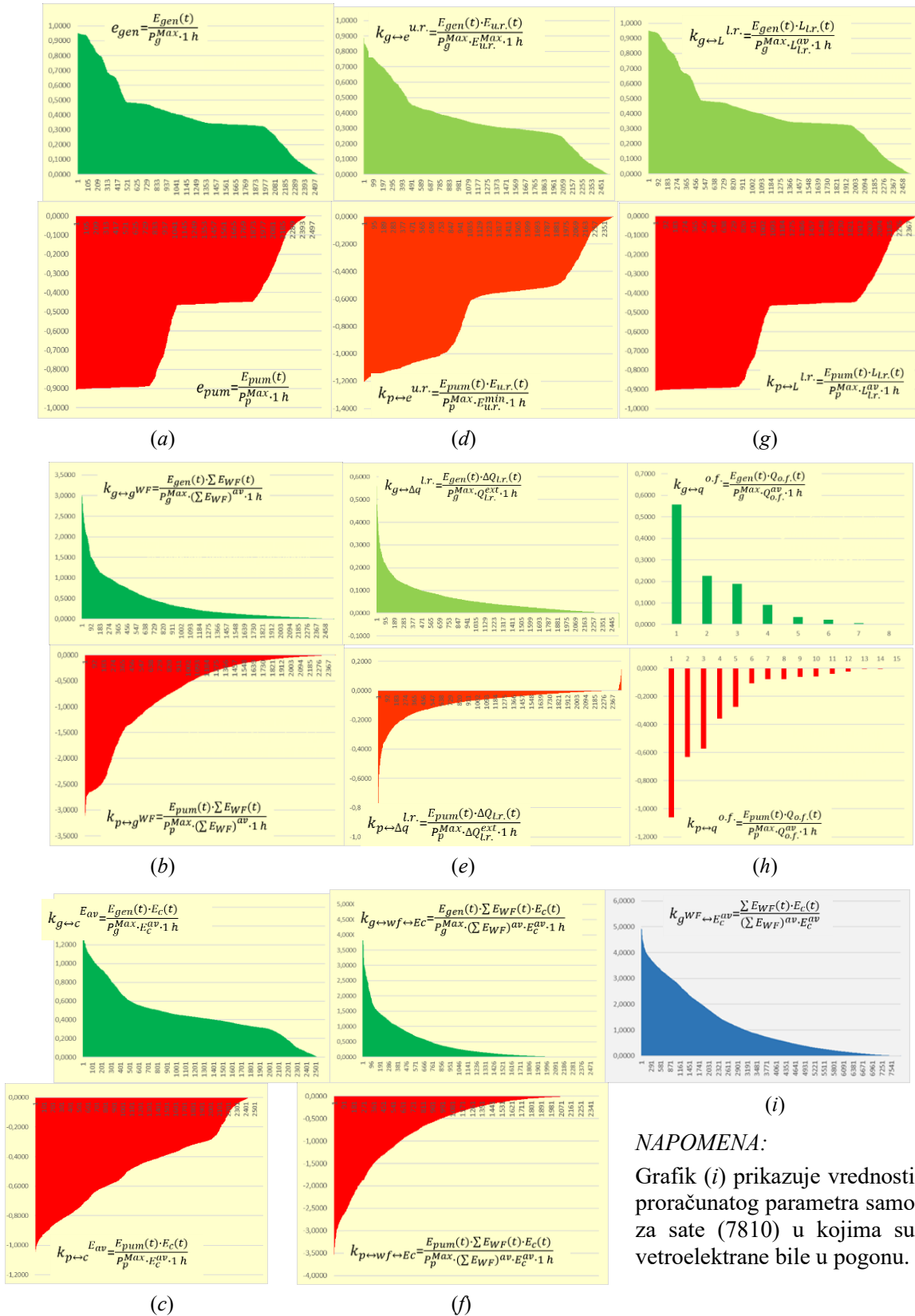
Slika 12: Poklapanje generatorskog (levo) i pumpnog (desno) režima rada RHE i proizvodnje iz vetroelektrana sa opadajućim cenama IntraDay na HUPX

### 3.4 Uređeni dijagrami karakterističnih parametara

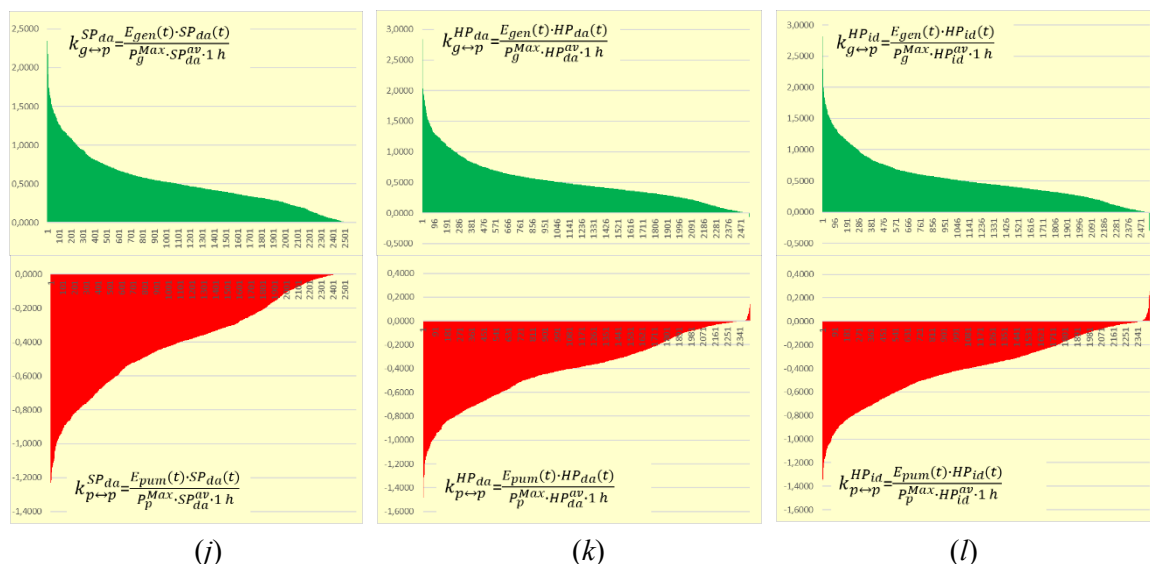
Naredni grafici, na slikama 13 i 14, prikazuju vrednosti proračunatih parametara samo za sate u kojima je RHE bila u pogonu.

Na grafiku (a) na Slici 13 prikazane su opadajuće vrednosti faktora angažovanja RHE „Bajina Bašta“ tokom 2023. godine u generatorskom režimu (gornji grafik) i u pumpnom režimu (donji grafik). Na grafiku (i) sa Slike 13 prikazane su opadajuće vrednosti koeficijenta korelacije proizvodnje iz vetroelektrana u balansnoj grupi EPS AD sa satnim potrošnjama konzuma svedenim na njihovu srednju godišnju vrednost.





Slika 13: Uređeni dijagrami hidroloških i tehničkih parametara, po opadajućim vrednostima



Slika 14: Uređeni dijagrami tržišnih parametara, po opadajućim vrednostima

Na ostalim graficima sa slika 13 i 14 prikazane su, takođe u opadajućim nizovima svojih vrednosti, sledeći karakteristični faktori korelacije generatorskog režima (gornji grafici) i pumpnog režima rada (donji grafici) RHE „Bajina Bašta“, sa:

- (b) proizvodnjom iz vetroelektrana u balansnoj grupi EPS AD;
- (c) srednjom godišnjom vrednošću satne potrošnje konzuma;
- (d) stanjem gornje akumulacije;
- (e) bilansom dotoka, protoka i preliva na HE „Bajina Bašta“ (na donjoj akumulaciji);
- (f) proizvodnjom iz vetroelektrana i potrošnjom konzuma;
- (g) kotama reke Drine (tj. donje akumulacije, Perućackog jezera);
- (h) prelivima na HE „Bajina Bašta“;
- (j) srednjom godišnjom vrednošću cene električne energije na tržištu „dan unapred“ SEEPEX;
- (k) srednjom godišnjom vrednošću cene električne energije na tržištu „dan unapred“ HUPX;
- (l) srednjom godišnjom vrednošću cene električne energije na unutardnevnom tržištu HUPX.

### 3.5 Komentari u vezi sa dobijenim rezultatima

Za svaki od ovde sračunatih parametara iz Tabele IV, moguće je odrediti optimalnu vrednost i njenu marginu. Na primer, ako koeficijent  $k_{p \leftrightarrow q}^{lr}$ , prikazan na slici 13.e, ima veću (apsolutnu) vrednost, korišćenje RHE u pumpnom režimu je povoljnije, pod uslovom da je kota donje akumulacije,  $L_{Lr}$ , dovoljno iznad svoje minimalne vrednosti. Što je veća apsolutna vrednost koeficijenta  $k_{p \leftrightarrow g}^{WF}$ , sa donjeg grafika na slici 13.b, to je pumpni režim rada RHE isplativiji. Za periode malih opterećenja konzuma, uz prisutnu proizvodnju iz vetroparkova, vrednost koeficijenta  $k_{g \leftrightarrow g}^{WF \leftrightarrow Ec}$ , sa gornjeg grafika na slici 13.f, treba da bude što manja ili jednaka nuli (osim ako ne postoji mogućnost za izvoz električne energije proizvedene u RHE, kada ovaj koeficijent može biti i veći). Za periode velikih opterećenja konzuma, uz prisutnu proizvodnju iz vetroparkova, vrednost ovoga koeficijenta treba da teži 1,0 (osim ukoliko ne postoji mogućnost za izvoz električne energije proizvedene u RHE, kada ovaj koeficijent može biti i veći).

Činjenica da upravljiv pumpni režim nije moguć na RHE „Bajina Bašta“ jasno se uočava na desnim graficima na slikama 2-12 i na donjim graficima sa slika 3.4.a, d i g. Za razliku od nje, za buduću RHE „Bistrica“ planiraju se četiri agregata sa promenljivom brzinom i u pumpnom režimu, [11]. U eksploataciji ovakvo pumpno postrojenje imaće prednost u aktivaciji i „finoj“ regulaciji, kao i u boljem „peglanju“ odstupanja u novom, 15-minutnom balansnom mehanizmu. Posebno je pitanje sa da li će, uz postojeću, buduća RHE „Bistrica“ biti dovoljna za balansiranje EES sa svim planiranim V-OIE kapacitetima, uz postepeno gašenje termoelektrana kao glavnih proizvođača bazne energije, ili će biti potrebna i RHE „Đerdap 3“ ili neka od RHE predloženih u studiji [12]. Korišćenje ovde predložene metodologije za simulacije planiranih stanja može doprineti definisanju odgovora i na ovo pitanje.

Primetno je povećanje, iz godine u godinu, broja sati sa negativnim cenama na berzama električne energije u inostranstvu. One se jasno vide i na graficima sa slika 11, 12, 14.k i 14.l. Nakon izmena zakona, srpska berza takođe treba da uvede negativne cene, pa se može očekivati da se njihovom pojavom pojača efekat isplativosti RHE. Osim balansiranja našeg EES, odgovarajućim njihovim angažovanjem koristili bi se i ovakvi „poremećaji“ na unutardnevnom tržištu i tako uvećavala vrednost akumulirane energije.

#### 4 ZAKLJUČAK

Primenom metodologije predložene i opisane u ovom radu na slučaj angažovanja postojeće RHE „Bajina Bašta“ tokom 2023. godine, pokazuje se da uticaj hidroloških parametara nije toliko značajan, kao ni stepen kompatibilnosti sa proizvodnjom iz vetroelektrana, dok je on veći u slučaju potrošnje konzuma, a najveći i najpovoljniji u odnosu na cene električne energije. Međutim, mora se napomenuti da su trenutni instalisani kapaciteti V-OIE u EES-u Srbije relativno mali, dok sa druge strane cene na berzama SEEPEX i HUPX veoma zavise od proizvodnje V-OIE koji su locirani u evropskim zemljama. Prethodno dovodi do zaključka da V-OIE imaju značajan uticaj na rad postojeće RHE, zasad indirektno, preko cena na spot tržištima.

Zahvaljujući veličini gornje akumulacije, u slučaju ove RHE hidrološki uslovi imaju mali uticaj na registrovane načine rada RHE, jer ona svoju snagu i energiju pre svega crpi iz potencijalne snage i energije akumulirane vode, kao primarnog resursa. Pri tome, sadržaj gornje akumulacije RHE na kraju svake sedmice vraća se na ciljne vrednosti, postavljene dugoročnom optimizacijom (elektroenergetskim portfeljom). I uticaj same RHE na kote donje akumulacije relativno je mali, takođe zbog njene veličine. To svakako neće biti slučaj kod buduće RHE „Bistrica“, koja će svojim angažovanjem značajnije uticati na osetno manju svoju donju akumulaciju Potpeć na Limu, koji ima takođe znatno manje dotoke od onih na Drini. Takođe, primenjena metodologija je u ovom radu redukovana u pogledu gornje akumulacije Zaovine, koja nema značajne vodotokove koji bi joj obezbeđivali i prirodni dotok. Nasuprot tome, u slučaju RHE „Bistrica“ njena gornja akumulacija Klak, u svom zaleđu imaće celu kaskadu HE i akumulacija na Uvcu. I u tom pogledu, ova buduća RHE predstavlja jedan opštiji slučaj, interesantan za primenu ovde opisane metodologije, pa autori planiraju nastavak ovog istraživanja upravo na njenom primeru.

Kad je reč o V-OIE, sa porastom njihovog udela u proizvodnom miksu EES Srbije, za očekivanje je da dođe do značajnijeg rasta potrebe da RHE odgovore na sve veće strmine, maksimume i minimume električne snage, koje će ovi izvori unositi u rezultujući dijagram opterećenja.



Posledično se može očekivati i otklon od sada konstatovanog prioriteta rada postojeće RHE „Bajina Bašta“ u smislu najvećeg stepena kompatibilnosti sa cenama električne energije na tržištu, ka tehničkim zahtevima koji se budu nametnuli po pitanju balansiranja i ka većem stepenu usklađivanja sa režimima rada V-OIE. Stoga autori planiraju da nastave rad na unapređenju opisane metodologije po pitanju određivanja globalnog višekriterijumskog maksimuma pri optimizaciji rada RHE i da ovu metodologiju primene u svrhu simulacije stanja sa povećanim udelom V-OIE u proizvodnom miksu.

Što se tiče samog stepena usklađenosti rada RHE sa tržišnim uslovima, trenutno stanje koje je ovde ilustrovano jeste takvo da je akcenat stavljen na unutar sedmičnoj i unutar dnevnoj optimizaciji rada ove RHE. Na osnovu razlike u cenama električne energije tokom neradnih i radnih dana, kao i razlike u cenama unutar dana, pokazano je da se pomoću RHE može ostvariti značajan profit.

## 5 LITERATURA

- [1] Kumar, R., Kumar A., Optimal scheduling of variable speed pumped storage, solar and wind energy system, March 2021, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects 47(1):1-16, DOI: 10.1080/15567036.2021.1892243
- [2] Gomes, J., G., Telhada J., Xu, H., da Costa, A. S., Zhao, C., Optimal operation scheduling of a pump hydro storage system coupled with a wind farm, IET Renew. Power Gener. 2021; 15:173–192, DOI: 10.1049/rpg2.12014
- [3] Yao, W., Li, W., Liu, R., Sun, Y., Optimal capacity of variable-speed pumped storage for wind power consumption based on double-layer stochastic programming, March 2023, Journal of Renewable and Sustainable Energy 15(2):024103, DOI: 10.1063/5.0135560
- [4] Contaxis, G., Vlachos, A., Optimal Power Flow Considering Operation of Wind Parks and Pump Storage Hydro Units under Large Scale Integration of Renewable Energy Sources, Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, IEEE Volume: 3, DOI: 10.1109/PESW.2000.847616
- [5] Alharbi, T., Abo-Elyousr, F. K., Abdelshafy, A. M., Efficient Coordination of Renewable Energy Resources through Optimal Reversible Pumped Hydro-Storage Integration for Autonomous Microgrid Economic Operation, June 2024, Energy 304(2):131910, DOI: 10.1016/j.energy.2024.131910
- [6] Abu Taha, S. A., Gomaa, M. R., Al-Ma'asfeh, S., Hydro Pump Storage System Driven by PV System for Peak Demand, WSEAS Transactions on Systems, April 2022, DOI: 10.37394/23202.2022.21.5
- [7] Ibekwe, E. C., Amadi, H. N., Horsfall, D. J., Solar Pumped Hydro Turbine Storage System for Efficient Power Supply, 2024, International Journal of Engineering and Modern Technology (IJEMT), Vol 10. No. 9, p.p. 94-106, DOI: 10.56201/ijemt.v10.no9.2024.pg94.106

- [8] Lugauer, F. J., Kainz, J., Gaderer M., Techno-Economic Efficiency Analysis of Various Operating Strategies for Micro-Hydro Storage Using a Pump as a Turbine, *Energies* 2021, 14, 425. <https://doi.org/10.3390/en14020425>
- [9] Tadayon, L., Meiers, J., Ibing, L., Erdelkamp, K., Frey, G., Coordinated operation of pumped hydro energy storage with reversible pump turbine and co-located battery energy storage system, *Automatisierungstechnik*, 2025; 73(2): 136–144, <https://doi.org/10.1515/auto-2024-0128>
- [10] Favaro, P., Dolanyi, M., Vallee, F., Toubreau, J-F., Neural network informed day-ahead scheduling of pumped hydro energy storage, *Energy*, December 2023, DOI: 10.1016/j.energy.2023.129999
- [11] Energoprojekt Hidroinženjering a.d., Elektroenergetski koordinacioni centar, Idejni projekat izgradnje RHE „Bistrica“, investiciono-tehnička dokumentacija rađena za EPS AD, 2025.
- [12] Energoprojekt Hidroinženjering a.d., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Studija o mogućnostima izgradnje reverzibilnih hidroelektrana i pumpno-akumulacionih postrojenja u Srbiji, studija rađena za EPS AD, 2024.