

Оптимално управљање водопривредним системима у периоду наиласка поплавних таласа – Примјер система на Требишњици и Врбасу у Републици Српској

Милица Трифковић¹
Тамара Судар²
Тина Дашић³
Милош Станић⁴

АПСТРАКТ: Осавремењавање управљања постојећих и развој нових интегралних водопривредних система би требало да буде један од основних покретача одрживог развоја Републике Српске. Окосницу привредног развоја чине водни потенцијали ријека Требишњице и Врбаса. Иако се ради о различитим сливовима, на којима су реализовани објекти различитих карактеристика, могуће је дефинисање заједничког циља, а то је повећање ефективности рада и побољшање активне улоге изграђених система на умањењу ризика од поплава у периодима наиласка великих вода. Како се ради о стратешким хидроенергетским објектима, потребно је помирити интересе између два кључна корисника - хидроенергетике са једне и активне одбране од поплава са друге стране. Уважавајући неуправљивост водним режимима на притокама низводно од изграђених објеката Требишњице и Врбаса, активно управљање вишенамјенским акумулацијама све више добија на значају. Користећи расположиве подлоге и податке о наведеним системима, математичким моделима су оптимизоване активне улоге вишенамјенских акумулација, укључујући могуће неутралисање посљедица суперпозиције поплавних таласа из акумулација и низводних притока у циљу заштите урбаних подручја – Града Бања Луке и Града Требиња. Оптимизационе анализе спроведене су методом вишекритеријумске оптимизације, односно методом Парето фронта. У оквиру рада је, уз спроведене анализе сваког система посебно, дат осврт на сличности и разлике, али и на заједничке стратешке одреднице и принципе управљања овим сложеним системима.

Кључне ријечи: интегрални водопривредни систем, активна заштита од поплава, математичко моделирање, оптимизација.

Optimal operation of water management systems during flood waves – case study: the systems on the Trebisnjica and Vrbas in Republika Srpska

ABSTRACT: Modernising operation of the existing, and development of new, integrated water management systems should be one of the basic instruments of sustainable development in the Republika Srpska. The backbone of economic development is the water potentials of the Trebisnjica and Vrbas. Although these are different river basins where facilities with different characteristics are constructed, it is possible to define a common goal: increase the effectiveness of the systems operation and improve their active role in reducing flood risk during flood flows. Given that these are strategic hydropower facilities, it is necessary to reconcile the interests between two key users: hydropower on one side and active flood defence on the other. Recognising uncontrollable flow regimes on the tributaries downstream from the facilities on the Trebisnjica and Vrbas, active management of multipurpose reservoirs is becoming increasingly important. Using available maps and data on these systems, mathematical models optimized the active roles of multipurpose reservoirs, including a possible offset of the consequences of superposition of flood waves from the reservoirs and downstream tributaries to protect urban areas of Banja Luka and Trebinje. Optimization analyses used the multicriteria optimization method, i.e. the Pareto Front Method. In addition to the analyses carried out for each system

¹ Милица Трифковић, студент, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, milica3fkovic@gmail.com

² Тамара, Судар, студент, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, sudartamaraa@gmail.com

³ Проф. др Тина, Дашић, дипл. грађ. инжењер, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, mtina@grf.bg.ac.rs

⁴ Проф. др Милош Станић, дипл. грађ. инжењер, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, mstanic@grf.bg.ac.rs

separately, this paper also gives a review of similarities and differences, as well as common strategic factors and principles of operating these complex systems.

Keywords: integrated water management systems, active flood defence, mathematical modelling, optimization.

1 Увод

У условима погоршања режима великих вода, најчешће условљеним климатским променама, заштита од поплава примјеном активног управљања ублажавањем поплавних таласа у акумулацијама постаје све значајнија. Код већине вишенамјенских акумулација, још при пројектовању планира се простор за прихватање и акумулисање поплавних таласа. Поред активне заштите од поплава неопходно је, приликом сагледавања укупних ефеката, имати у виду и економске показатеље производње електричне енергије, који се односе на неискоришћену енергију (преливи, темељни испусти). Због тога овом сложеном проблему треба приступити са више аспеката и користити доступне методе и алате којима се оптимизују ефекти заштите од поплава [11 и 14].

Након израде Планава управљања у условима наиласка великих вода и увођења у оперативно коришћење управљачких математичких модела, могу се остварити Планирани ефекти активне улоге акумулација у заштити од великих вода. Математички модели обезбјеђују значајну подршку оперативном управљању јер се, уз уважавање критеријума минимизације излазног таласа ($Q_{\max} \rightarrow \min$), може анализирати довољан број опција и одабрати одговарајућа управљачка одлука [5].

Користећи расположиве подлоге и податке, математичким моделима су оптимизоване активне улоге вишенамјенских акумулација на ријекама Требишњици (акумулација Билећа и акумулација Требиње) и Врбас (акумулација Бочац), укључујући могуће неутралисање посљедица суперпозиције поплавних таласа из акумулација и низводних притока у циљу заштите урбаних подручја – Града Требиња и Града Бања Луке [9, 15 и 16].

Као кључни циљ овог рада истиче се потреба за анализом могућности повећања ефективности система, нарочито побољшања активне улоге наведених акумулација код умањења поплавног ризика у периодима наиласка великих вода. Како су у питању сложени водопривредни системи на релативно малом подручју, постављени циљ добија утолико већи смисао имајући у виду веома малу развијеност - изграђеност планираних водопривредних система, нарочито оних на притокама Требишњице и Врбаса, са значајном корисном запремином акумулација. У погледу економске валоризације, развој нових акумулација добија на значају, како са аспекта неискоришћене енергије, тако и ради обезбјеђења потреба за остале кориснике (наводњавање, ЕПП, итд.)

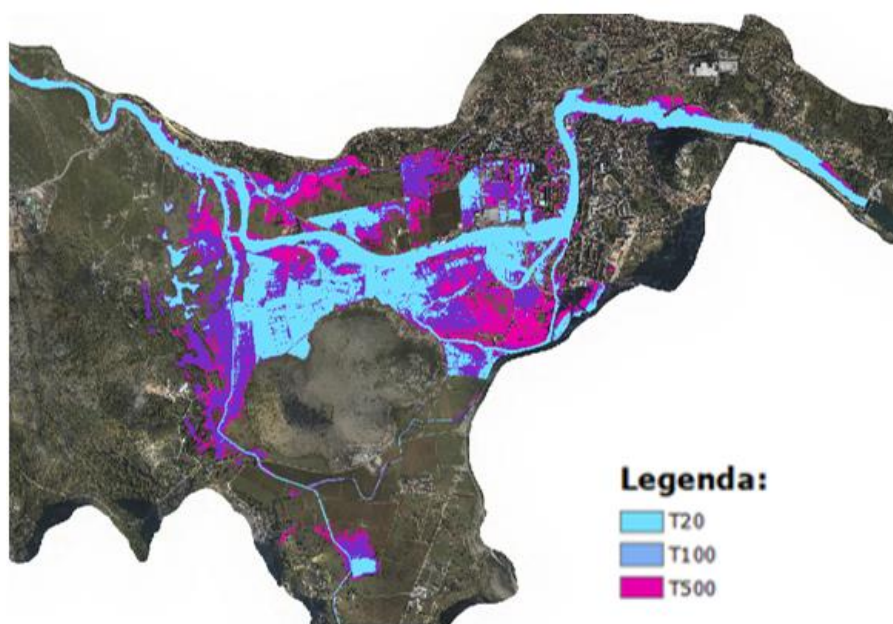
На основу хидролошких података и техничких карактеристика хидромеханичке опреме на бранама Граначарево и Горица (на ријеци Требишњици), те на брани Бочац (на ријеци Врбас) и запремина акумулација, као и дефинисаних опсега плавлена за велике рачунске воде повратног периода T100 и тренутни пропусни капацитет корита ријека Требишњице и Врбаса у урбаним потезима, неопходно је:

- анализирати управљање наведеним акумулацијама – управљање евакуационим органима на профилима кључних брана користећи математички модел трансформације поплавних таласа;
- извршити минимизацију протока методом оптимизације и
- успоставити заједничке основе (сличности и разлике) и унификацију стратегије управљања разматраних водопривредних система.

2 Сагледавање постојећих ризика од поплава

У Републици Српској је у посљедњих неколико година извршена израда Мапа опасности и ризика од поплава. Ова значајна документација посједује специфичности, нарочито на подручјима под утицајима сложених водопривредних система.

Вишенамјенски хидроенергетски систем Хидроелектрана на Требишњици (ХЕТ), са Билећком и Требињском акумулацијом користи се за производњу електричне енергије, наводњавање пољопривредних површина, али има и доминантну улогу у активној заштити од поплава Града Требиња, Требињског и Поповог поља. Овакав вид разнолике намјене остварује се и на пољу водопривредних система ХЕ на Врбасу, гдје се као кључни дио система у одбрани од поплава Града Бања Луке истиче акумулација Бочац. Позитивна улога наведених акумулација у посљедњих 20 година рада подстакла је осјећај сигурности од поплава таласа код локалног становништва, што је даље довело до ширења насеља и неконтролисана урбанизације у зони широке ријечне долине Требишњице кроз коју се пропуштају таласи великих вода (слика 1). Због овакве ситуације урбане садржаје и град угрожава проток од око $400 \text{ m}^3/\text{s}$, док је некада тај праг био значајно већи и до $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$, колико приближно износи велика вода Т100 на профилу Горица у природном стању, чиме се примјећује перманентно смањење пропусности корита ријеке Требишњице.



Слика 1. Мапа плавног подручја – опсег плављења у граду Требињу за уобичајне повратне периоде [8]

Figure 1. Map of the floodplain – flood extent in the City of Trebinje for the usual return periods [8]

Великом водом повратног периода Т100 (уважавајући утицаје трансформације у акумулацијама) под ризицима од поплава у урбаном подручју Требиња је: површина од 344 ha, 156 стамбених објеката, 5 привредних објеката, 6 јавних установа и око 8 km градских саобраћајница.

Слична проблематика неконтролисана урбанизације, али и негативних ефеката интензивне сјече шума, на подручју слива ријеке Врбас условила је знатно измијењене хидролошке и хидрауличке режиме. У таквим околностима се заштита Града Бања Луке од поплава обавља комбиновано, активним управљањем акумулацијама и пасивним мјерама уређења ријечног корита Врбаса изградњом паралелних заштитних објеката уз ријечна корита водотокова.

У документацији [11], која разматра опасности и ризике од поплава, дефинисани су опсежи плављења, високе опасности и ризици од поплава, те екстремне појаве у урбаном подручју Града Бања Лука, на потезу насеља Лазарево у Трну. На мапама ризика у Граду Бања Лука (слика 2) за стогодишњу велику воду T100 дефинисано је да се у плавној зони од 86 ха налази 330 објеката становања и 42 значајна привредна субјекта, па је јасно да улога активног управљања са постојећим пасивним мјерама, треба да буде кључна у заштити овог подручја од поплава.



Слика 2. Приказ ризика од поплава по становништво на сливу ријеке Врбас у Граду Бања Лука, за велику воду T100 [11]

Figure 2. Flood risk for population in the Vrbas River Basin in the City of Banja Luka for T100 flood flows [11]

3 Диспозиција водопривредних система са кључним перформансама објеката

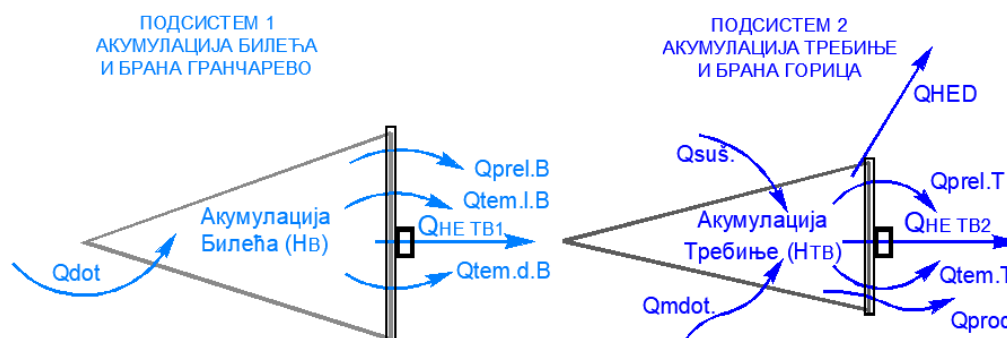
У циљу ефективног сагледавања улога у активној одбрани од поплава разматраних водопривредних система на ријекама Требишњици и Врбасу неопходно је, прије свега, предочити диспозиције (положаје кључних објеката водопривредних система и плавних подручја) и основне техничке карактеристике објеката.

Систем хидроелектрана на Требишњици представља интегрални вишенамјенски водопривредни систем лоциран узводно од Града Требиња, који је у фази развоја и доградње. Овај „каскадни“ и просторно повезани систем за сада чине двије (слика 3), функционално и техничко-технолошки зависне цјелине:

- акумулација Билећа – која обезбјеђује сезонско изравнање протицаја, значајне корисне запремине $V = 1070 \times 10^6 \text{ m}^3$ и брана Гранчарево (подсистем 1) и
- акумулација Требиње – која обезбјеђује дневно изравнање мале корисне запремине $V = 9,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ и брана Горица, као и тунел за ХЕ Дубровник 1 (подсистем 2).

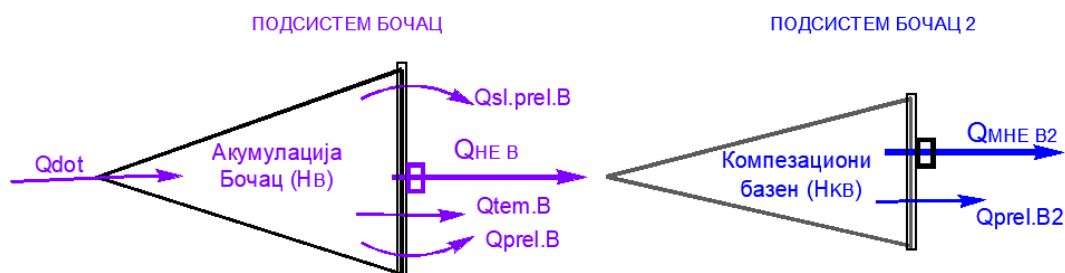
Удаљеност између брана је око 20 km и то је потез који заузима подсистем 2, док је удаљеност плавног подручја од доње каскаде од 7-8 km. Евакуација великих вода из подсистема

1 се обавља преко прелива са сегментним уставама, гдје се маневар сегментним уставама обавља на оба преливна поља симултано и преко темељних испуста који су симетрични у односу на осовину бране. Излази темељних испуста су постављени тако да се млазеви на средини корита сучељавају, те се на тај начин врши дисипација енергије, због чега се увијек отварају симултано - оба испуста истовремено са истим процентом отворености затварача.



Слика 3. Шематски приказ подсистема вишенамјенског хидроенергетског система „Требишњица“ [15]

Figure 3. Diagram of the subsystem of the „Trebisnjica“ multipurpose hydropower system [15]



Слика 4. Шематски приказ подсистема вишенамјенског хидроенергетског система „Врбас“ [16]

Figure 4. Diagram of the subsystem of the „Vrbas“ multipurpose hydropower system [16]

Систем хидроелектрана на Врбасу представља интегрални водопривредни систем, који се налази узводно од Града Бања Лука. Овај систем за сада чине двије (слика 4), функционално и техничко-технолошки зависне цјелине:

- акумулација Бочац релативно мале корисне запремине $V = 42,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ и брана са машинском зградом ХЕ Бочац – Подсистем Бочац и
- компезациони базен скромне корисне запремине $V = 2,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ и брана са машинском зградом МХЕ Бочац 2 – Подсистем Бочац 2.

Евакуација великих вода обавља се коришћењем три евакуатора:

- темељног испуста,
- бочног прелива у десном боку - два преливна поља са сегментним затварачима и
- слободног бочног прелива у лијевом боку - накнадно изведен, у циљу повећања хидрауличке поузданости бране у условима екстремних таласа великих вода.

Како би се ефектније спознале заједничке и универзалне стратешке одреднице које карактеришу оба система, те јасније приближили резултати спроведених анализа, у даљим анализама уводе се сљедеће скраћене нотације за називе разматраних водопривредних система (ВС), без умањења семантичке вриједности:

- ВС „Требишњица“ и
- ВС „Врбас“.

Важно је напоменути да се у периодима наиласка великих вода, који су уједно и предмет анализе овог рада, улога низводних акумулација у оба ВС због њихове скромне запремине, занемарује.

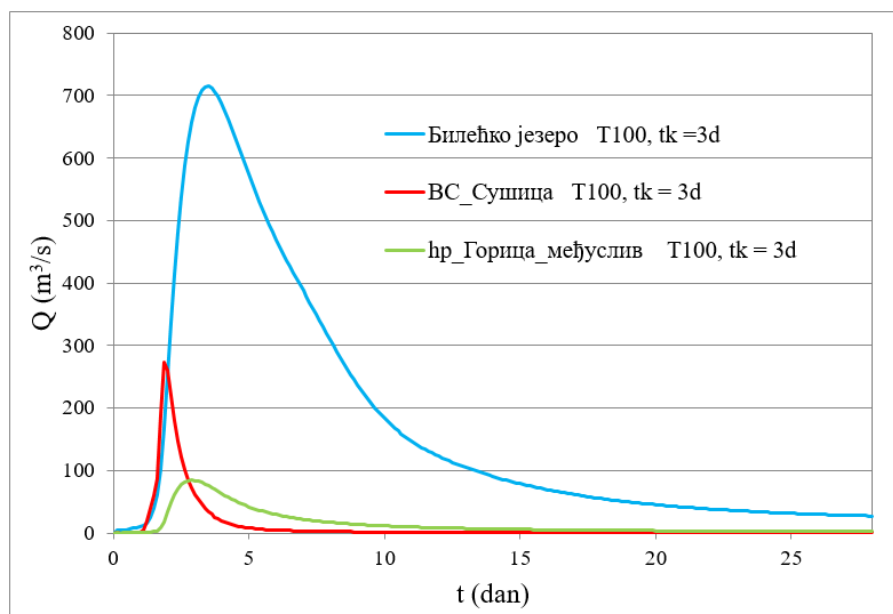
4 Поставка математичког модела ублажавања поплавних таласа

4.1 Преглед расположивих, рачунских хидрограма великих вода

У сливу ријеке Требишњице, која је изразито крашко подручје са доминантним подземним токовима, падавински и водни режими су изузетно неравномијерни са израженим периодима појаве великих и малих вода. Због тога је управљање системом акумулација и енергетских постројења у периоду појаве великих вода комплексно, јер је условљено веома динамичним развојем процеса падавина и отицаја у најширем хидрогеолошком сливу. Периоди настанка и генеза поплавних таласа дати су у склопу Студије [14] и Семинарског рада [15].

У анализама утицаја великих вода и учинка активног управљања акумулацијама до 2020. године коришћени су синтетички хидрограми. У Мапама опасности и ризика од поплава дефинисане су велике рачунске воде Т20, Т100 и Т500, на основу комплексних анализа падавина трајања 3 и 5 дана и калибрације хидролошко-хидрауличког модела сливног подручја ријеке Требишњице [8].

У овом раду, као улазни подаци математичког модела користе се велике рачунске воде од падавина трајања 3 дана и то велике рачунске стогодишње воде (Т100). Ове воде су добијене уважавајући ефекте трансформације великих вода у акумулацијама, након разматрања сливног подручја акумулације Билећа и сливног подручја акумулације Требиње, уважавајући подземне везе и доступне податке о реализованим нивоима и протицајима са хидроелектрана, на основу којих је извршена калибрација и валидација хидролошког модела.



Слика 5: Рачунски дотоци у акумулације Билећа и Требиње за повратни период Т100 година и рачунску кишу трајања 3 дана [8]

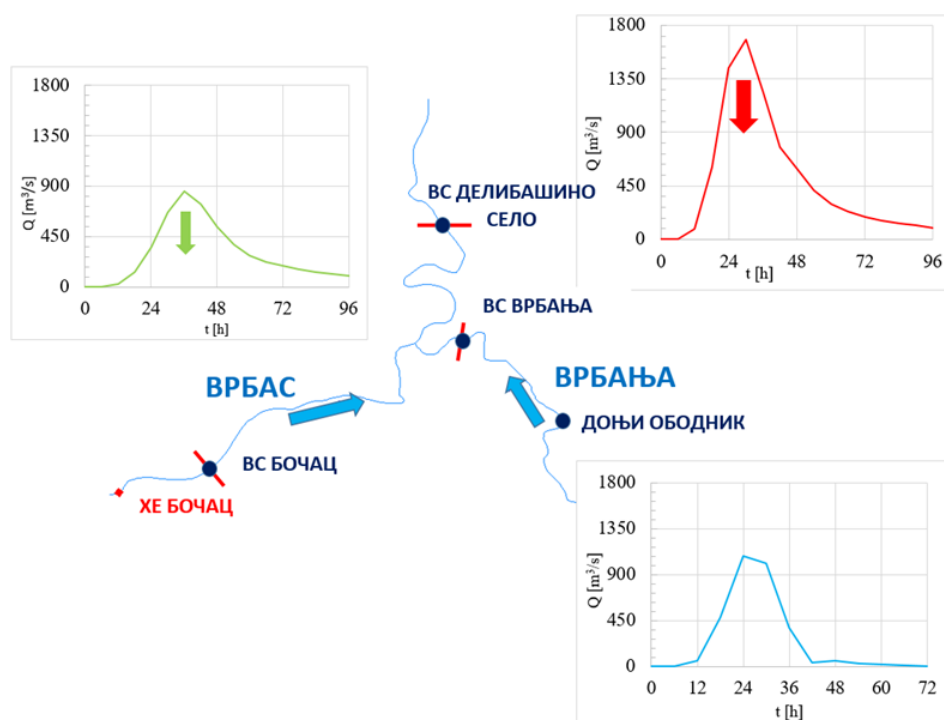
Figure 5: Modelled inflows into the Bileća and Trebinje reservoirs for the return period of T100 and 3-day design rainfall [8]

Имајући у виду да је за оптимизацију управљања неопходно уважити низводни гранични услов, који диктира плавно подручје у Граду Требињу, евидентно је да је потребно обратити посебну пажњу на велике воде властитог слива акумулације Требиње и бујичног водотока Сушице који се не могу трансформисати у акумулацијама, односно на њихове максималне вриједности у односу на доток у акумулацији Билећа. Очигледно је да се они реализују од трећег до шестог дана, када настаје пик поплавног таласа у акумулацији Билећа, док пик великих вода са властитог слива у акумулацији Требиње настаје око 4. дана, што се узима као важан гранични услов (избјегавање суперпозиције) у математичком моделирању.

На плавним подручјима слива ријеке Врбас спроведене су детаљне хидролошке и хидрауличке анализе (математички модели [11]), на основу којих су формирану улазни подаци, значајни за активну одбрану од поплава, односно за прорачун и анализе које су спроведене у оквиру овог рада. Уважавајући просторни распоред и висинске положаје метеоролошких станица, према различитим мјеродавним трајањима кише на метеоролошким станицама (МС), формирана су два реално могућа (и код настанка великих вода већ уочена) сценарија [9]:

- Сценарио 1 - мјеродавно трајање кише је 24 h на свим МС
- Сценарио 2 - меродавно трајање кише на МС Бугојно и Јајце је 12 h, док је на МС Бања Лука 24 h.

У овом раду се анализира активна улога акумулације Боцац у одбрани од поплава према сценарију 1 и то за талас повратног периода 100 година, као и на систему ВС Требиње. Поступак прорачуна трансформације поплавног таласа, резултати, као и анализа истих детаљно је обрађена у оквиру [16].



Слика 6. Шематски приказ могуће суперпозиције поплавних таласа T100 на ријекама Врбас и Врбања

Figure 6. Diagram of possible superposition of T100 flood waves on the Vrbas and Vrbanja

Потез уз ријеку Врбас на урбаном подручју Бања Луке је под високим ризиком од поплава, а додатне и несагледиве посљедице може да узрокује суперпозиција „пикова“ поплавних таласа Врбаса и Врбање јер је у низводном дијелу ушћа смјештен Град Бања Лука, гдје се налази високо ризично плавно подручје.

Из проведених описа слиједи важан закључак: кључни гранични услов у заштити од поплава разматраних ВС Требишњица и Врбас, у што је већој мјери оперативним управљањем - управљивог дијела система (трансформациом пика таласа у главном току), јесте избјећи суперпозиције пикова поплавних таласа главних токова и бујичних притока низводно од акумулација у којима се не могу трансформисати:

- Требишњица + бујични водоток Сушица укључујући међуслив акумулације Требиње
- Врбас + бујични водоток Врбања.

Наведене констатације се илуструју на примјеру Врбаса и Врбање за плавно подручје Бања Луке (слика 6) гдје је приказана хидрографска мрежа главних токова и хидрограми великих рачунских вода повратног периода T100 година (сценарио 1) на ВС Бочац, ВС Врбања и ВС Делибашино село.

Уочавају се максималне вриједности протока притоке Врбање (ВС Врбања) које су за око 300 m³/s веће од пика поплавног таласа на ријеци Врбас (ВС Бочац) што доводи до закључка да би, приликом разраде стратегије управљања акумулацијом Бочац требало, поред улазних великих вода у акумулацију, узети у обзир шире низводно подручје слива и утицаје великих вода којима се не може управљати, а које значајно утичу на кључна плавна подручја. У конкретном случају то би неизоставно подразумијевало анализу и редовно осматрање промјена на водомјерним станицама на ријеци Врбањи (ВС Врбања и узводна ВС Доњи Ободник), те одговарајући оперативни рад акумулацијом Бочац уважавајући овај низводни гранични услов.

Посљедица интензивне сјече шума на потезу слива ријеке Врбање у последњих 25 година, изазвала је повећање пика поплавног таласа за око 40% и формирање изразито стрме узлазне гране хидрограма, што се манифестује кроз појаву велике количине воде у кратком временском распону уз значајне ерозионе процесе и пронос наноса.

На основу наведених карактеристика поплавних таласа на главним токовима и притокама, долази се до закључка који је заједнички за оба ВС: неопходно је спровести управљање акумулацијама Билећа и Бочац које би допринијело, не само смањењу пика поплавног таласа на главним токовима (Требишњица и Врбас), него и пика таласа низводно од ушћа (збирног таласа који је сачињен од неуправљивог низводног дотицаја) која репрезентује велике воде на кључним плавним подручјима.

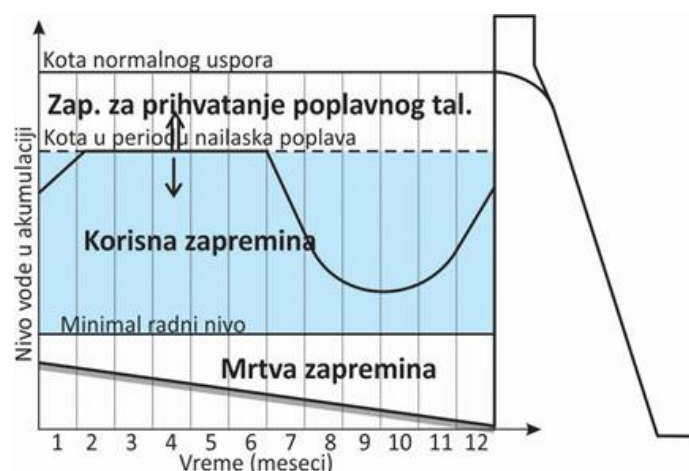
4.2 Приоритети у процесима оперативног управљања ВС „Требишњица“ и ВС „Врбас“

Када се очекују већи и дуготрајнији интензитети падавина и појаве таласа великих вода, стратегија управљања објектима хидроенергетског система Требишњица се из нормалног стања управљања подређује приоритету – одбрани од поплава. Идентична филозофија управљања примјењује се и на ВС „Врбас“, гдје је такође у периодима наилаaska великих вода приоритетна функција одбране од поплава.

У овом случају се управљачке одлуке о режиму пуњења и пражњења како акумулације Билећа тако и акумулације Бочац, које су уједно и кључне за активну заштиту од поплава, могу третирати и као дуални оптимизациони задатак из Теорије игара (Ђорђевић, 1990) са два 'играча' - корисника акумулације, који имају међусобно супротстављене критеријумске захтјеве.

Дуални проблем сукоба интереса два корисника шематски је приказан на слици 7. Уочавају се двије супротне стратегије:

- хидроенергетика којој је у интересу да се дијаграм пуњења и пражњења акумулације помијера ка вишим котам, тј. што већим акумулисаним запреминама воде (смјер интереса означен са \Rightarrow),
- смјер интереса активне одбране од поплава је сасвим супротан – пожељно је веће пражњење акумулације (обарање кота) и помијерање дијаграма пуњења током времена у смјеру који обезбјеђује да се у што већем броју мјесеци одржавају ниске коте (смјер интереса означен са \rightarrow).



Слика 7. Сукобљени интереси код режима пуњења и пражњења акумулације са два кључна корисника: хидроенергетика (смјер интереса: \Rightarrow) и активна заштита од поплава (смјер интереса: \rightarrow) [9]

Figure 7. Conflicting interests of the two key users in the reservoir refill and drawdown: hydropower (direction of interest: \Rightarrow) and active flood protection (direction of interest: \rightarrow) [9]

У кризним периодима одбране од поплава приоритетан постаје други критеријум, тако да се током проласка великих таласа рад ХЕ мора подредити интересима заштите низводних подручја.

4.3 Могућности трансформације поплавних таласа активном улогом акумулација

Користећи расположиве подлоге и прикупљене податаке сагледене су могућности трансформације (ублажења) поплавних таласа у акумулацијама Билећа и Бочац. На основу прорачунских шема сачињен је математички модел трансформације поплавних таласа, којим је анализирана могућност активне одбране од поплава радом поменутих акумулација за разне прорачунске случајеве, односно различите велике рачунске воде и полазне коте у акумулацијама (слика 3 и 4). Математички модел за прорачун трансформације поплавног таласа у акумулацији, у општем случају, описује се диференцијалним једначинама нестационарног течења:

- *једначина континуитета*

$$\frac{\partial Q}{\partial A} + \frac{\partial A}{\partial t} = Q \quad (1)$$

- *динамичка једначина*

$$\frac{\partial Q}{B \cdot \partial x} + \xi \cdot \left(\frac{V}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} = I - I_{te} \quad (2)$$

У циљу поједностављења прорачуна, а не умањујући његов значај, за анализу пропагације таласа у акумулацији уводи се неколико претпоставки:

- ✓ Занемарују се инерцијални члан и члан који обухвата утицај промјене брзине, јер су у случају акумулација знатно мањи од осталих чланова,
- ✓ претпоставља се да је ниво воде у акумулацији хоризонталан, што значи да се запремина воде у акумулацији и протицај могу директно изразити преко нивоа воде,
- ✓ занемарује се вријеме простирања поремећаја кроз акумулацију, односно претпоставља се да се улазни доток распореди по цијелој запремини акумулације у једном прорачунском кораку.

Уводећи дате претпоставке, горе наведене једначине (1) и (2) се могу написати у поједностављеном облику гдје је:

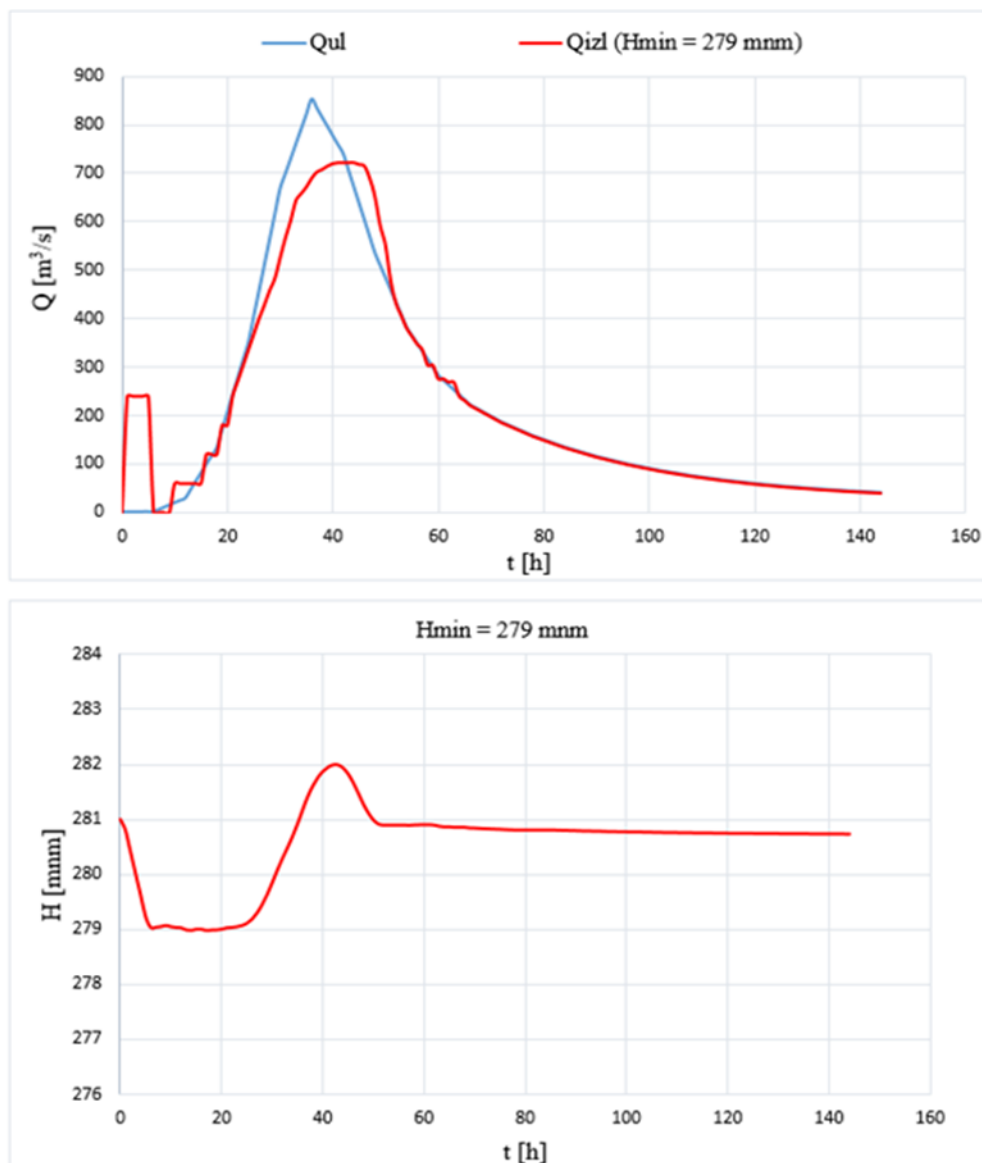
- једначина континуитета за запремину акумулације $V(t)$

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_{dot}(t) - Q_{izl}(t) \quad (3)$$

- динамичка једначина се замјењује кривом запремине акумулације

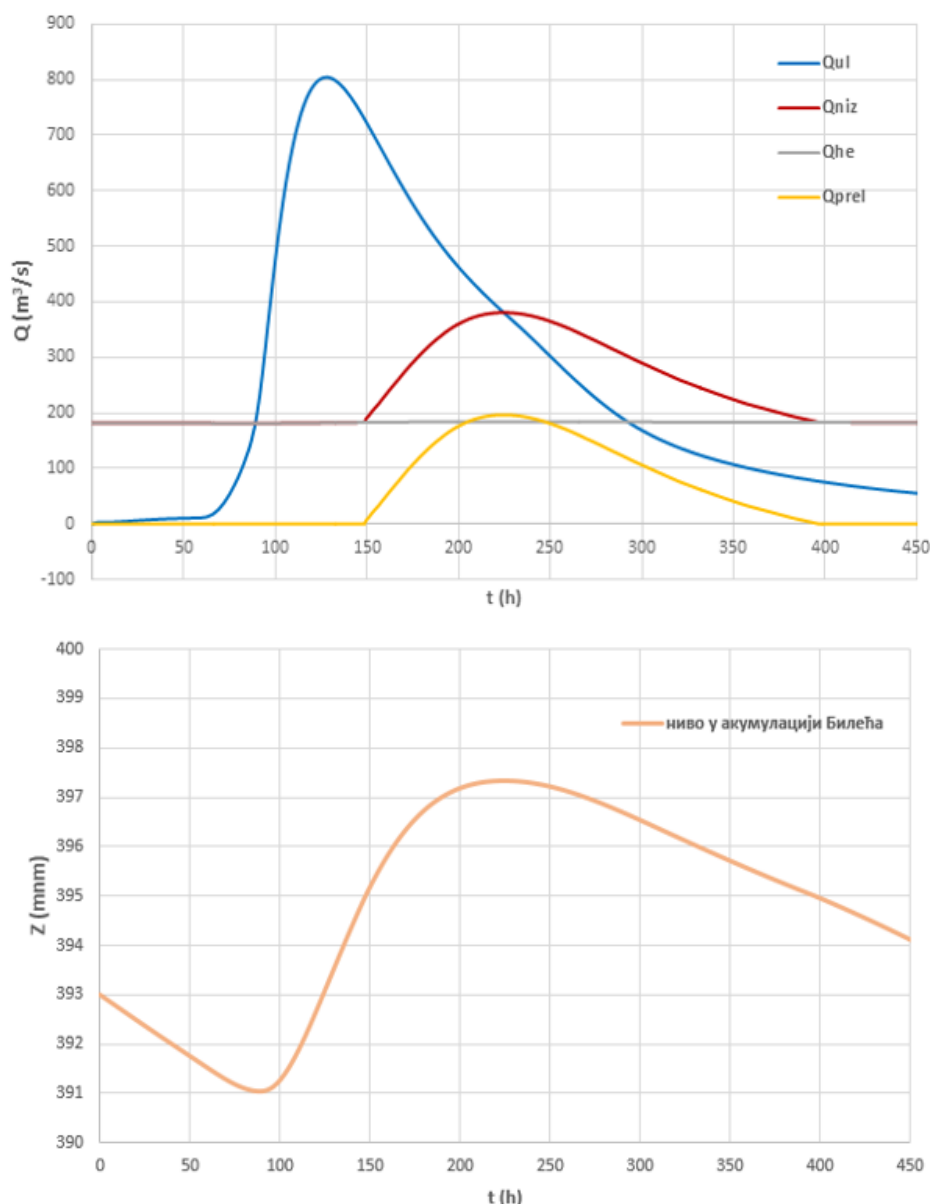
$$V = V(Z) \quad (4)$$

гдје је $Q_{dot}(t)$ – доток у акумулацију (проток улазног таласа) у тренутку t , $Q_{izl}(t)$ – проток излазног таласа у тренутку t , који је функција нивоа воде у акумулацији у одговарајућем тренутку, па се може дефинисати као: $Q_{izl}(t) = Q_{izl}(Z(t))$. На сликама 8 и 9 дато је по једно рјешење трансформације за акумулацију Бочац и Билећа.



Слика 8. Трансформација поплавног таласа и промјена нивоа воде у акумулацији Бочац за повратни период T100 ($H_{B,0} = 281$ mm, $H_{B,min} = 279$ mm, $H_{B,K} = 281$ mm)

Figure 8. Flood wave attenuation and change of water levels in the Voćac reservoir for T100 return period ($H_{B,0} = 281$ m a.s.l, $H_{B,min} = 279$ m a.s.l, $H_{B,K} = 281$ m a.s.l.)



Слика 9. Трансформација поплавног таласа и промјена нивоа воде у акумулацији Билећа за повратни период T100 (ангажована 3 агрегата у периоду активног управљања; према Плану управљања и отварања евакуатора провјерава се опција рада евакуатора $H_{B,0} = 393$ mnm, $H_{B,min} = 391$ mnm)

Figure 9. Flood wave attenuation and change of water level in the Bileća reservoir for T100 return period (3 turbine generator units operating in the period of active management; according to the Plan of managing and opening the gates, the option of gate operation is verified $H_{B,0} = 393$ m a.s.l., $H_{B,min} = 391$ m a.s.l.)

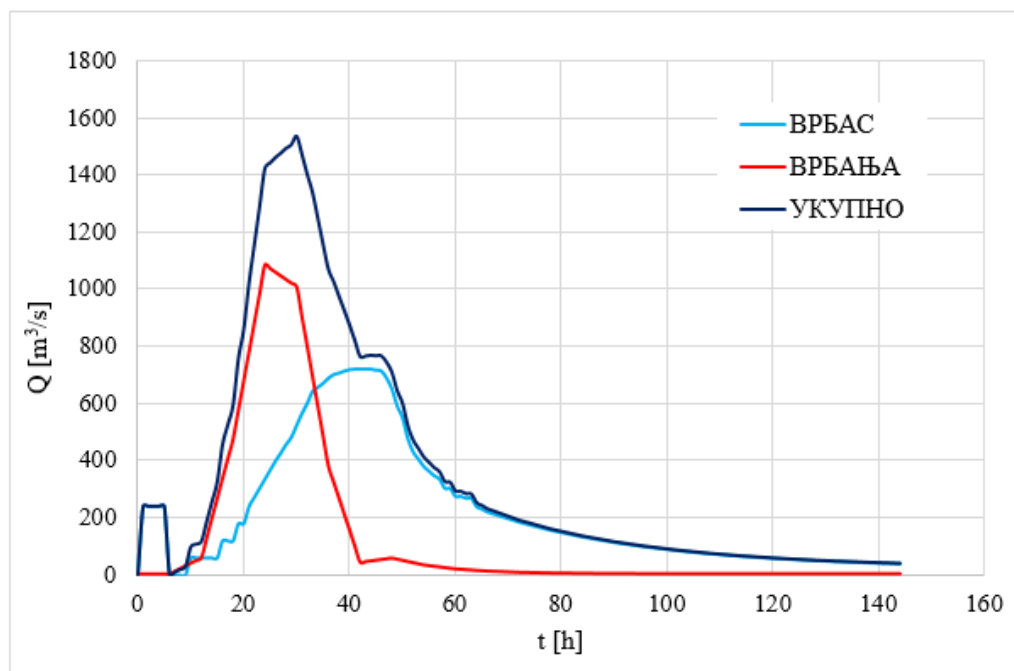
Подаци који су варирани у прорачуну су:

- Почетни ниво воде у акумулацији ($H_{B,0}$)
- Ниво при ком се почиње са отварањем устава на бочним преливима ($H_{B,U}$)
- Ниво до кога је дозвољено спустити ниво воде у акумулацији ($H_{B,min}$)
- Ниво на коме је потребно задржати воду након проласка поплавног таласа ($H_{B,K}$).

На основу теоретских поставки и формираних математичких модела, проведене су сљедеће анализе:

1. поступак трансформације поплавног таласа на профилима акумулација Билећа и Бочац,
 2. прорачун запремине преливене воде на профилима акумулација Билећа и Бочац,
 3. суперпозиција добијеног таласа са поплавним таласом притока (Требишњица + Сушица и Врбас + Врбања)
 4. Парето фронт анализа – вишекритеријумска оптимизација
- Кључни услови за теоретску поставку проведених анализа су:
- агрегати у сваком случају имају првенство рада током периода активног управљања за било који мјесец или период у години, а према исказаној потреби сва претпражњења и евакуације из акумулација обављају се уз максимално учешће агрегата,
 - за ВС „Врбас“ претпражњење по постојећем плану управљања ограничено до 279 mm, што је, на основу [11], предложено да се спусти минимално на 275 mm,
 - за ВС „Требишњица“, ради се анализа режима у зимском периоду (октобар-фебруар), према Плану управљања [14].

За потребе анализе оптималног управљања, у условима великих вода анализиран је низ варијантних рјешења која су разврстана у различите Парето фронтове поступком који је детаљно обрађен у оквиру поглавља 5. Варијацијом наведених улазних података као резултат добијени су трансформисани, ублажени поплавни таласи на профилима низводно од акумулација Билећа и Бочац, који суперпозицијом са осматреним поплавним таласима на неуправљивим дијеловима слива (притоке Сушице и Врбања) дају збирни ублажени поплавни талас од кога треба да се бране низводна градска подручја Требиња и Бања Луке (слика 10).



Слика 10. Приказ ефекта активног управљања – избјегнута потпуна суперпозиција поплавног таласа ријека Врбас и Врбања ($H_{B,0} = 281$ mm, $H_{B,min} = 279$ mm, $H_{B,K} = 281$ mm) – без значајнијих поплава у Бања Луци

Figure 10. The effect of active management - avoided complete superposition of the flood wave of the rivers Vrbas and Vrbanja ($H_{B,0} = 281$ m a.s.l., $H_{B,min} = 279$ m a.s.l., $H_{B,K} = 281$ m a.s.l.) - without significant floods in Banja Luka

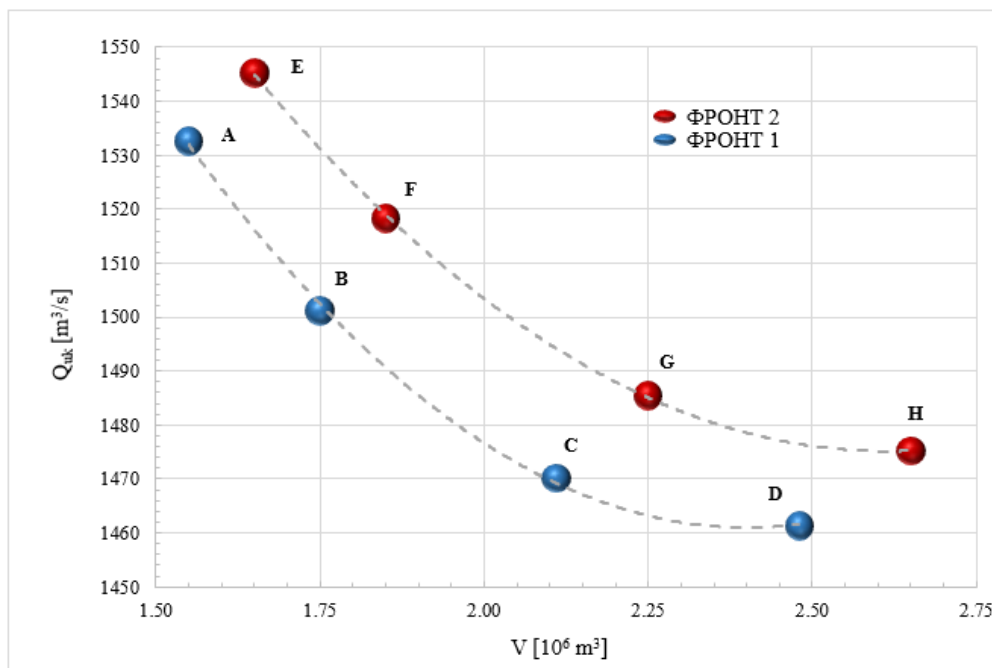
На основу спроведених прорачуна трансформације поплавног таласа на профилу бране и акумулације Бочац, те извршене суперпозиције наведеног таласа са поплавним таласом на ријеци Врбањи приступљено је вишекритеријумској оптимизацији преливања (губитка производње електричне енергије) формирањем Парето фронта, која у конкретном задатку, представља минимизацију протока и запремине преливене воде на профилу непосредно низводно од акумулација Билећа и Бочац.

5 Оптимизација управљања у условима великих вода

У наведеним поставкама управљања, поред избјегавања суперпозиције „пикова“ поплавних таласа, неопходно је извршити оптимизације преливања (рационализовати рад прелива и темелних испуста), односно, тежити умањењу губитака производње електричне енергије, коришћењем Парето фронт методе.

5.1 Примјена Парето фронт методе у анализи оптималног управљања ВС „Требишњица“ и ВС „Врбас“ у условима великих вода

Након спроведеног прорачуна трансформације поплавног таласа уз варирање података о нивоима воде и суперпозицијом истог са одговарајућим притокама (Требишњица + Сушица и Врбас + Врбања) формирана су рјешења у виду податка о збирном протицају (Q_{uk}) и запремини преливене воде (V_{pu}), од којих се даље формирају Парето фронтови, чиме се уједно врши и анализа оптималног управљања.



Слика 11. Рјешења суперпозиције поплавних таласа за ВС „Врбас“ подијељена у Парето фронтове

Figure 11. Flood wave superposition solutions for the Vrbas divided into Pareto fronts

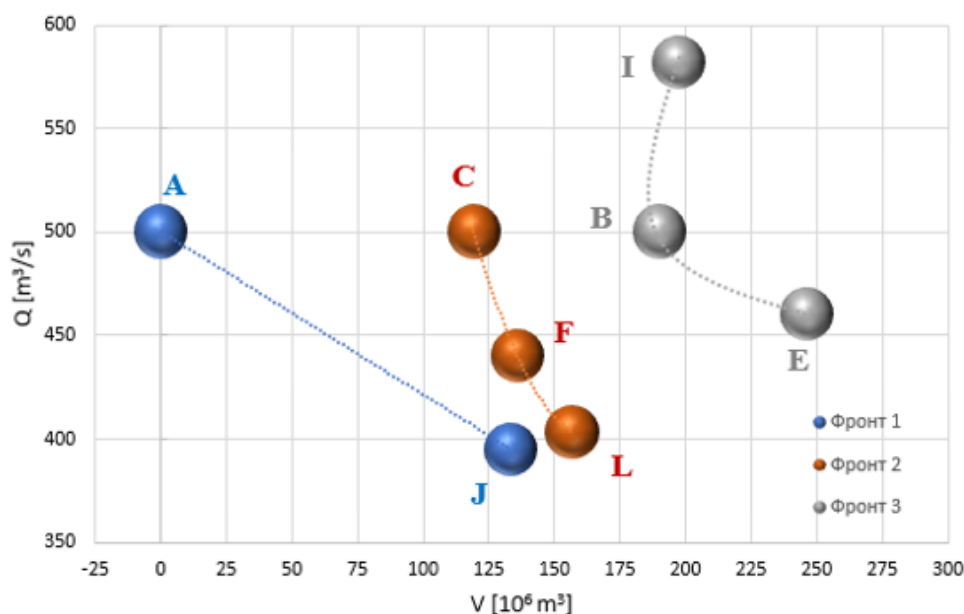
На слици 11 дат је приказ рјешења за ВС „Врбас“ подијељених у Парето фронтове. Наиме, позицију сваког од приказаних рјешења (A - H) дефинишу координате Q_{uk}^{max} и V_{pu}^{max} , односно функције циља. Комплетан прорачун трансформације поплавног таласа извршен је у програмском пакету MatLab [16], примјеном нумеричке шеме засноване на "предиктор – коректор" методи, чиме је дефинисан један од података – излазни протицај на профилу ХЕ Бочац

(Q_1). На основу рачунских великих вода истих повратних периода на ријеци Врбањи (Q_2) извршена је суперпозиција ова два таласа ($Q_1 + Q_2$) чиме је дефинисан укупни протицај (Q_{uk}) на профилу непосредно низводно од ушћа ријеке Врбање у ријеку Врбас. Идентичан поступак примијењен је и на примјеру ВС „Требиње“ [15], при чему је вриједност протока Q_1 излазни протицај на профилу акумулације Билећа, а Q_2 протицај рачунских великих вода истих повратних периода на Сушици и дотока са међуслива.

Минимизација максималне вриједности ординате укупног протока Q_{uk}^{max} представља прву функцију циља. Прорачун запремине преливене воде V_{pu} извршен је на основу резултата прорачуна вриједности протока на преливу са уставама, док минимизација максималне вриједности V_{pu}^{max} дефинише другу функцију циља.

У циљу разумијевања поступка примјене Парето фронта потребно је, прије свега, предочити концепт доминације рјешења који је најлакше објаснити помоћу већ добијених резултата приказаних на слици 15. Наиме, за једно рјешење може се рећи да је доминантно у односу на неко друго само онда када прво рјешење посједује оптималније вриједности за сваку функцију циља. Уколико то није случај, рјешења су недоминантна. Тако, на примјер, за рјешење А са слике 15 се може рећи да је доминантно у односу на решење Е зато што посједује оптималнију вриједност за обје функције циља. Међутим, за рјешења А и Н каже се да су недоминантна јер рјешење А посједује оптималнију вриједност за другу по реду функцију циља (мања вриједност V_{pu}^{max}), док рјешење Н посједује оптималније рјешење за прву функцију циља (мања вриједност Q_{uk}^{max}). Тачније, у склопу овог алгоритма свако рјешење у оквиру популације упоређује се са свим осталим рјешењима понаособ и на тај начин сортирају се рјешења и дијеле у различите Парето фронтове. У случају великог броја јединки унутар популације и великог броја функција циља, такво сортирање представља сложен проблем. Како је задатком дефинисана примјена двије функције циља, Парето поступак је поприлично поједностављен, док је сложеност изражена кроз разноликост и бројност варијантних рјешења.

Примјењујући наведени поступак, извршено је и формирање Парето фронтова за ВС „Требишњица“ (слика 12) гдје су због разноврсности варијантних рјешења остварена три фронта.



Слика 12: Рјешења суперпозиције поплавних таласа за ВС „Требиње“ подијељена у Парето фронтове

Figure 12. Flood wave superposition solutions for the Trebinje divided into Pareto fronts

Након дефинисаних Парето фронтова (фронт 1, фронт 2 и фронт 3) неопходно је објаснити и појам Парето рјешења. Наиме, рјешење одређеног векторског максимума представљено је

скупом неинфериорних (Парето оптималних) рјешења од којих, по свим критеријумима, не постоји боље рјешење. На тај начин долази се до закључка да се Парето анализом не долази до јасно дефинисаног, јединственог и једнозначног рјешења, него да је то скуп рјешења која формирају један Парето фронт.

Најадекватније објашњење наведене дефиниције се постиже разматрањем примјера (слика 11), гдје се за рјешење А не може рећи да је тражено рјешење, нити за било које друго (рјешења од А до Н). Јединственост ове врсте вишекритеријумске анализе огледа се у томе да је рјешење задатог проблема дато у виду скупа неинфериорних рјешења груписаних у Парето фронтове.

На основу претходно наведеног, долази се до закључка да се тражено рјешење „креће“ по оформљеном Парето фронту, а ту различитост и промјену положаја наведеног рјешења дефинише промјена вриједности тежинских фактора (ω_1 и ω_2), који се у зависности од приоритета функција циља мијењају, најчешће, искуствено.

6 Дискусија – могућност примјене спроведених анализа у реалном управљању

Наведене теоретске поставке оптимизација управљања и проведене анализе у условима великих вода, имају смисла уколико су примјењиви у реалном управљању. Да би се остварили очекивани ефекти умањења ризика од поплава и рационализација преливања на евакуационим органима неопходно је обезбиједити одговарајуће управљачке услове.

Под управљачким условима се подразумијева одговарајући „степен“ оствареног развоја водопривредних система, односно услов да они припадају класи кибернетизованих система. Битне карактеристике кибернетизованих система су: ефективност се повећава током процеса развоја система; снижава се ентропија система у периоду управљачког самообучавања (увођењем нових информационих елемената и управљачких математичких модела); повећава се поузданост система, посебно у погледу оперативности и дјеловања у кризним ситуацијама као што је период наилаaska поплава таласа, јер се управљачке одлуке не доносе на бази искуства већ на бази симулирања на математичком моделу и оптимизације сваке управљачке одлуке, тако да се симулацијом провјеравају ефекти и посљедице управљачке одлуке прије него што се исте спроведу на реалном систему. Такво управљање онемогућава грешке које се дешавају у класи техничких система јер су кибернетизовани системи у сталном развоју, стално се допуњавају и информациони и управљачки дијелови система.

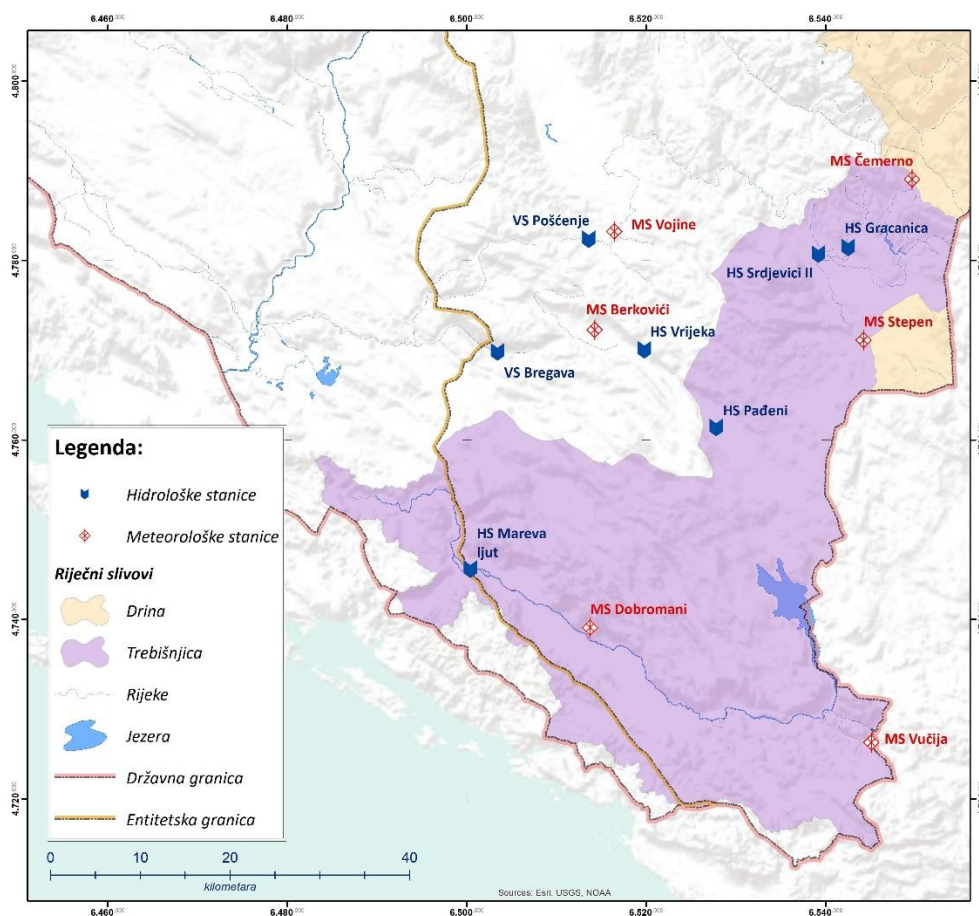
У резимеу примјењивости, може се констатовати да је минимум потребних услова:

- ✓ одговарајућа расположивост и функционалност расположиве хидромеханичке и остале опреме на објектима водопривредног система (ХЕ),
- ✓ одговарајући кадровски капацитети са потребним знањима и искуством,
- ✓ Планови управљања акумулацијама у условима великих вода одобрени од надлежних водопривредних органа,
- ✓ посједовање савремених и оперативних математичких модела који могу вршити брзе и прецизне анализе управљачких маневара, обзиром на прогнозиране дотоке у акумулацијама, полазне и реализоване коте у акумулацијама и контурне услове на плавним и осталим подручјима,
- ✓ инсталисан и оперативан метеоролошки и хидролошки мониторинг (укључујући и мјерење нивоа воде у подземљу), са on-line доставом података (у кратким временским интервалима), механизмима систематизације и прилагођавања захтјевима расположивих софтвера.

Постојећи ВС „Требишњица“ и „Врбас“ посједују све параметре кибернетизованих система, јер су поред функционалности хидромеханичке опреме и кадровских потенцијала, развијени системи мониторинга и примјена математичких модела код оперативног управљања.

Хидроелектране на Требишњици, у склопу Хидроинформационог система ХИС-Требишњица, развијају дужи временски период Модул за аутоматско прикупљање и аквизицију хидролошких података са веома развијеним хидролошким мониторингом кога сачињавају мјерне станице протицаја/водостаја и мјерне станице подземних вода – пијезометри. Базу података чине подаци са метеоролошких станица које су распоређене на Обласном ријечном сливу Требишњице и Неретве у Републици Српској, а значајан дио чине аутоматске метеоролошке станице (слика 13).

У току 2008. године започета је реализација Хидро-Информационог система „Врбас“, гдје је у првој фази извршена: анализа постојеће документације и релевантних података, дефинисање правила рада дијелова симулационог модела и опште логике рада модела, набавка, анализа и обрада серија хидрометеоролошких података, набавка, анализа и обрада ГИС подлога, итд.



Слика 13. Прегледна карта аутоматских мјерних станица (хидролошке и метеоролошке) у власништву ХЕТ-а

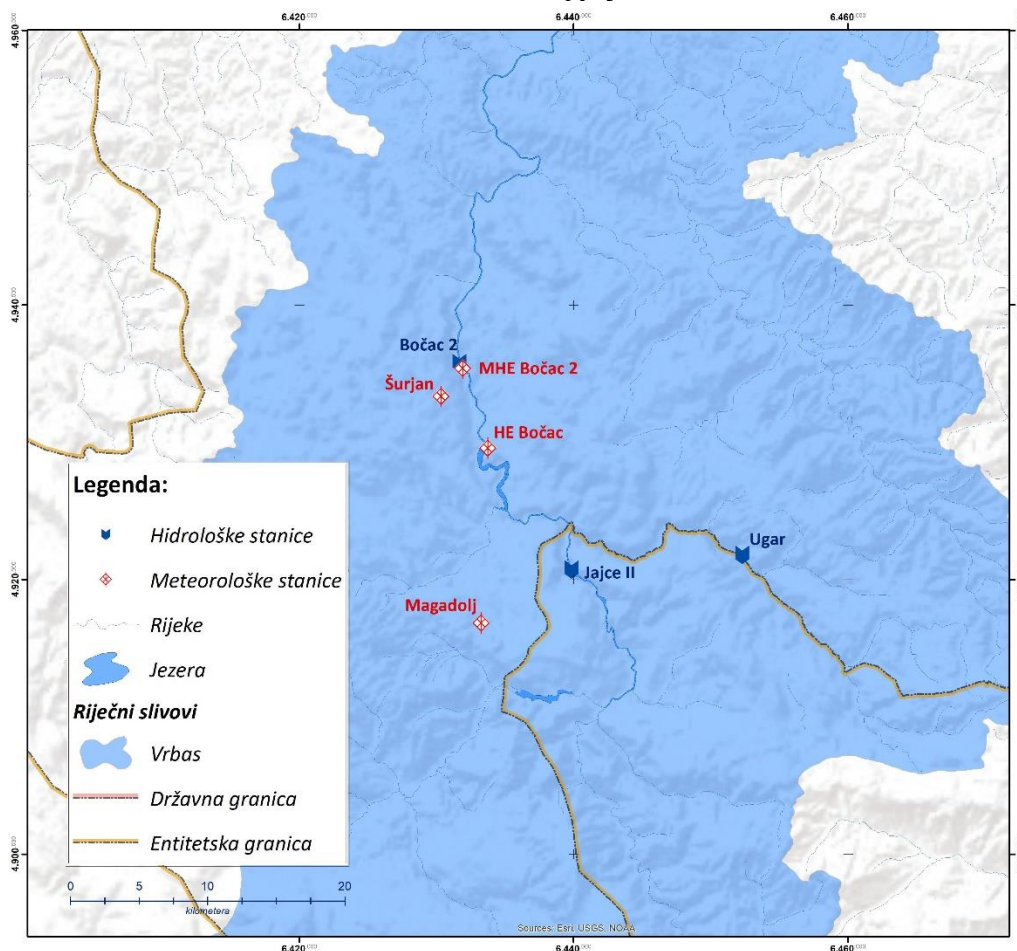
Figure 13. Map of automatic gauging stations (river and weather) owned by 'HET'

ХЕ на Врбасу су реализовале другу фазу развоја ХИС "Врбас" вер 2.0, који се састоји од скупа софтверских компоненти различите намене које су изграђене над дистрибуираним релационим базама. Мјерни систем обухвата аутоматске мјерне станице које су распоређене у потезу система и узводно (слика 14).

У склопу хидроинформационих система на Требишњици и Врбасу развијени су одговарајући математички модели за анализу управљања у условима великих вода, нпр. у систему Требишњица математички модел „Ублажавање поплавних таласа“ (Дашић и Ђорђевић

2012) [5]. Овај модел омогућава врло брзу и квалитетну анализу могућих сценарија и опција управљања и оператерима даје одговарајућу подршку приликом доношења управљачких одлука.

У оквиру разматраних анализа, уочава се да постојећи механизми у оквиру водопривредних система који су унутар ХЕТ-а и ХЕ на Врбасу, фокус анализа усмјеравају на узводни потез водопривредних система и евакуацију великих вода у оквиру властитих објеката као и, без већих последица, на низводна плавна потручја.



Слика 14. Прегледна карта аутоматских мјерних станица (хидролошке и метеоролошке) у власништву ХЕВ-а

Figure 14. Map of automatic gauging stations (river and weather) owned by 'HEV'

Управо у сегменту координације између корисника/сектора је потребно учинити одговарајући искорак и успоставити одговарајућу сарадњу сектора хидроенергетике са сектором вода. На сливу Врбаса, првенствено у аквизицији хидролошких података, преузимању података у плавним подручјима (дозвољени нивои и протицаји) као и података са осталих водотокова, није довољно разрађен сегмент управљања акумулацијама.

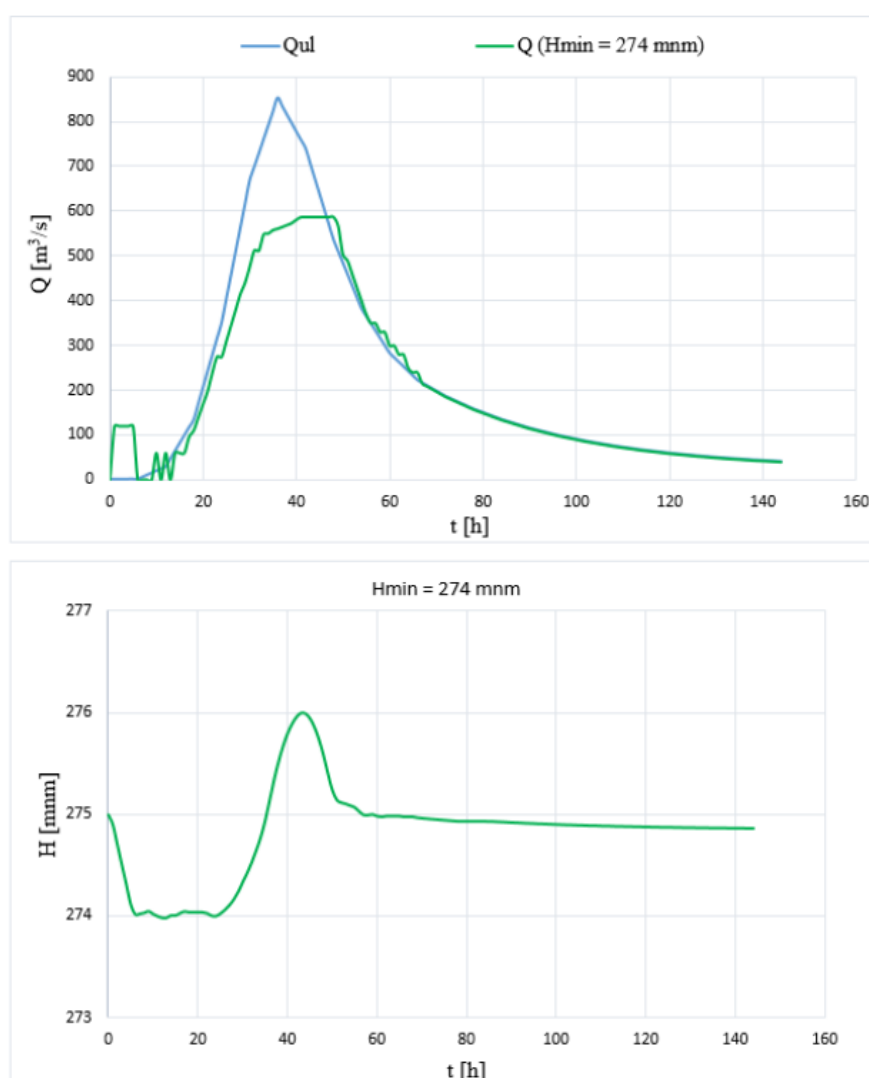
Очигледна је повезаност и условљеност два сектора која, првенствено у условима великих вода, треба да осигурају одговарајуће сарадње које понекад треба да буду у заједничком стратешком интересу осигурања одговарајућих услова на сливном подручју.

Та побошљања су дата у наредним анализама уз услов безусловне подршке потпуно поузданог хидролошког мониторинга и поштовања напредних алата, математичких модела и Планава управљања акумулацијама у условима великих вода.

6.1 Могућа побољшања – оптимизације преливања и умањења великих вода

Уколико су задовољени сви напредни управљачки услови у зависности од расположивих капацитета (корисних запремина) акумулација евидентно је да се уз посједовање савремених алата и механизма прогноза, контроле управљачких одлука математичким моделима уз константне провјере и самоконтроле, постижу побољшања по основу умањења вршног протока коз плавна подручја и умањење запремине преливања.

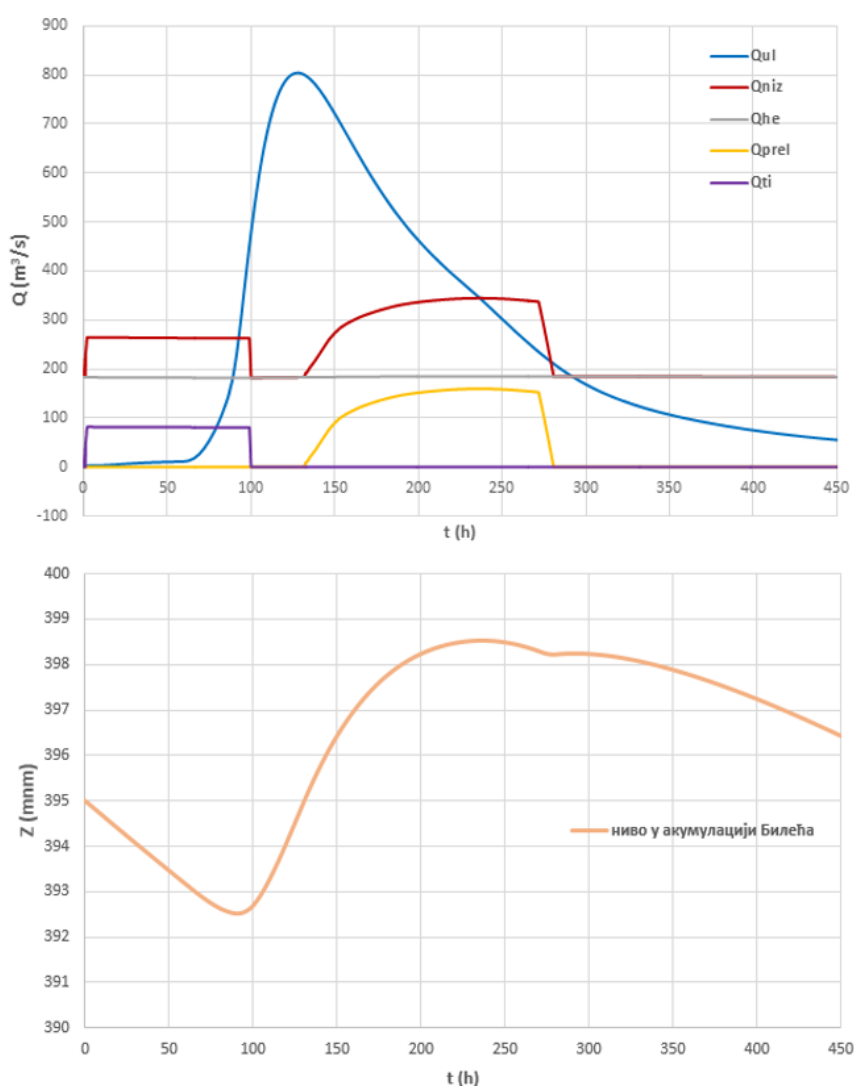
ВС Бочац. Због релативно мале корисне запремине ефекат ове акумулације треба да се концентрише у домену спрјечавања суперпозиција поплавних таласа, уз одговарајуће прогнозе дотока и математичке моделе. Циљ је извршити већа претпражњења до коте 275 mmn и ниже, како би се из акумулације Бочац испуштао, у потпуности или знатно трансформисан талас великих вода, док не прође „дик“ поплавног таласа Врбање. Рационализације су евидентне и по критеријуму активне заштите коришћењам акумулација, али и рационализацијом преливања (претпражњењем које се обавља агрегатима) се постижу ефекти производње (нешто умањени због мањег расположивог пада). Ефекти додатних оптимизација (слике 8 и 15) су евидентни.



Слика 15. Оптимизовани параметри преливања за већа претпражњења акумулације Бочац ($H_{B,0} = 275$ mmn, $H_{B,min} = 274$ mmn, $H_{B,K} = 275$ mmn)

Figure 15. Optimized spillway parameters for greater pre-release of water from the Bočac reservoir ($H_{B,0} = 275$ m a.s.l, $H_{B,min} = 274$ m a.s.l, $H_{B,K} = 275$ m a.s.l.)

BC Требишњица. Са веома великом корисном запремином, уз испуњавање напредних управљачких услова, акумулација Билећа дозвољава додатне оптимизације кључних параметара, нарочито у зимским условима (полазне коте акумулације су до 393 mmm). Уз рационална претпражњења, релаксацију реализованих кота (веће реализоване коте због поузданости моделирања и прогноза дотока) које је потребно верификовати Плановима управљања акумулацијом Билећа остварују се оптимизације у оба кључна параметра. Компарацијом резултата (слика 9 и слика 16) евидентне су рационализације преливања (вода је задржана у акумулацији). На основу спроведене анализе за зимски период године, очигледно је да се и у случају виших полазних кота од 395 mmm (слика 16) у мјесецу јануару, може реализовати прихватљив излазни хидрограм, гдје је потребно ограничено ангажовање темељних испуста од самог почетка активног управљања, како би се на вријеме извршило претпражњење и припрема акумулације за трансформацију поплавног таласа.



Слика 16. Оптимизовани параметри преливања за одговарајућа претпражњења и веће реализоване коте акумулације Билећа (рад 3 агрегата, комбиновани модификовани рад темељних испуста са 20% отворености и прелива са 30% отворености, виша полазна кота (395 mmm))

Figure 16. Optimized spillway parameters for appropriate pre-release of water and higher water elevations in the Bileća reservoir (operation of 3 turbine generator units, combined modified operation of bottom outlets with 20% opening and spillways with 30% opening, higher starting elevation (395m above sea level))

7 Закључци

Проведене су анализе са циљем дефинисања оптималног управљања у условима великих вода у два кључна водопривреда система у Републици Српској, који имају заједничких основа, али и неких специфичности, на које се обратила одговарајућа пажња.

Утицаји климатских промјена се све више уважавају у планирању мјера заштите са аспекта утицаја на поплаве и суше. Интегрални водопривредни системи једини могу да на одговарајући начин пруже адекватне одговоре у провођењу адаптивних мјера заштите од изразито неповољних трендова. Због тога се код водопривредних система одговарајућа пажња мора посветити унапрјеђењу услова оперативног управљања и рационалним мјерама током ванредних ситуација у коју спадају учестале поплаве.

Одговарајућим активним управљањем, које се заснива на проведеним оптимизацијама, могући су значајни ефекти код додатних доприноса у заштити од поплава на низводним плавним подручјима, као и рационализације производње енергије у условима наиласка великих вода.

Кључни закључци који важе за анализиране интегралне водопривредне системе, у адекватном одговору на климатске промјене у условима великих вода, су:

1. Да би се остварили очекивани ефекти умањења ризика од поплава и рационализација преливања на евакуационим органима неопходно је обезбиједити одговарајуће управљачке услове, односно да они припадају класи кибернетизованих система. Битне карактеристике **кибернетизованих система** су: ефективност се повећава током процеса развоја система; у периоду управљачког самообучавања (увођењем нових информационих елемената и управљачких математичких модела) снижава се ентропија система; повећава се поузданост система, посебно у погледу оперативности и дјеловања у кризним ситуацијама као што је период наиласка поплава таласа. Такво управљање онемогућава грешке које се дешавају у класи техничких система јер су кибернетизовани системи у сталном развоју, стално се допуњавају и информациони и управљачки дијелови система.
2. Да би се у оперативном управљању примијениле проведене оптимизације неопходно је остварити одговарајуће услове:
 - расположивост и функционалност хидромеханичке и остале опреме на објектима водопривредног система (ХЕ),
 - одговарајући кадровски капацитети са потребним знањима и искуством,
 - Планови управљања акумулацијама у условима великих вода одобрени од надлежних водопривредних органа, које је потребно новелирати и ускладити са проведеним оптимизацијама,
 - посједовање савремених и оперативних математичких модела који могу вршити брзе и прецизне анализе управљачких маневара, обзиром на прогнозиране дотоке у акумулацијама, полазне и реализоване коте у акумулацијама и низводне контурне услове,
 - одговарајући - функционалан метеоролошки и хидролошки мониторинг (укључујући и мјерење нивоа воде у подземљу), са on-line доставом података (у кратким временским интервалима), механизмима систематизације и прилагођавања расположивим софтверима,
3. За одговарајућу примјену оптимизација и оперативног управљања потребна је одговарајућа сарадња сектора вода и сектора хидроенергетике, односно успостављање функционалних механизма који дају допринос заједничким циљевима заштите од поплава и повећање производње електричне енергије,
4. Уз релаксацију контурних услова (претпращања до нижих кота и реализовани нивои до виших кота) могуће је постићи боље резултате трансформације великих вода у акумулацијама и мања преливања - већу производњу током наиласка поплава таласа,

5. По основу поставки за изграђене акумулације могу се уз испуњавање напредних управљачких услова постављати само оствариви циљеви, у конкретном примјеру:

- Због реалтивно мале корисне запремине акумулације Бочац ефекат ове акумулације треба да буде усмјерен у домену спрјечавања супепозиција поплавних таласа Врбаса и Врбање,
- великом корисном запремином, акумулација Билећа може да обезбиједи додатна унапрјеђења заштите од поплава и производње електричне енергије, нарочито у зимским условима.

Потребно је наставити развој ВС „Требишњица“ и ВС „Врбас“ до планираног нивоа, чиме се онда додатно повећавају ефекти заштите од поплава активним управљањем и повећање производње електричне енергије.

Литература

1. Водопривредна основа слива ријеке Врбас, СОУР Водопривреда БиХ, РО Воде БиХ, ООУР Завод за водопривреду, Сарајево (јун, 1987)
2. Дашић, Т. и Ђорђевић, Б. (2003): Метод за одређивање поузданости сложених водопривредних система, Водопривреда, 203-204;
3. Допунски евакуатор великих вода из акумулације ХЕ „Бочац“, Институт за водопривреду Јарослав Черни, Београд (2008),
4. Ђорђевић, Б. (1990): Водопривредни системи, Научна књига, Београд, ИСБН 86-23-41056-4,
5. Ђорђевић Б., Дашић Т., Судар Н., Повећање ефикасности управљања акумулацијама у периоду одбране од поплава – на примјеру хидроенергетског система на Требишњици, Водопривреда, 255-257 (2012), р.43-58;
6. Ђорђевић, Б. и сарадници (2004): Оптимизација и Естимација при планирању и управљању у систему Дрине, Водопривреда, 207-208;
7. Студија управљања акумулацијама и хидроелектранама система Требишњица, Завод за водопривреду Бијељина 2010. година;
8. Мапе опасности и ризика од поплава за обласни ријечни слив Требишњице у Републици Српској – Хидролошки и Хидраулички Извјештај, Завод за водопривреду & Институт за хидротехнику и водно еколошко инжењерство Грађевинског факултета у Београду 2020. година
9. План управљања ризиком од поплава за слив ријеке Врбас Републике Српске, КЊИГА 2 – Анекс 4.3 Завод за водопривреду & Институт за хидротехнику и водно еколошко инжењерство Грађевинског факултета у Београду, Бијељина (2018),
10. План управљања ризиком од поплава за слив ријеке Врбас Републике Српске, I Извјештај : Детаљни радни план са листом пројектних опција, Завод за водопривреду & Институт за хидротехнику водноеколошко инжењерство грађевинског факултета у Београду, Бијељина (2018),
11. План управљања ризиком од поплава за слив ријеке Врбас Републике Српске, Књига 1 – Сводни извјештај, Завод за водопривреду & Институт за хидротехнику водноеколошко инжењерство грађевинског факултета у Београду, Бања Лука (јул, 2019),
12. Савић, Ј. (2009): Увод у хидротехничке грађевине, Грађевински факултет Београд
13. Стратегија интегралног развоја водопривреде Републике Српске 2015-2024. година.
14. Студија управљања акумулацијама и хидроелектранама система Требишњица, Завод за водопривреду Бијељина 2010. година;
15. Судар, Т. (2020): Управљање акумулацијом Билећа, објектима Гранчарево и ХЕ Требиње 1 у условима великих вода, Семинарски рад – Управљање хидротехничким објектима.
16. Трифковић, М. (2020): Могућности ублажавања стогодишњег поплавног таласа активним управљањем акумулацијом Бочац на ријечи Врбас, Семинарски рад – Управљање хидротехничким објектима.
17. <https://plos.figshare.com/articles/figure/> ; Multi-objective optimization leading to Pareto-front of all solutions as the main objective
18. <https://journals.plos.org/ploscompbiol/article> ; A Pareto approach to resolve the conflict between information gain and experimental costs: Multiple-criteria design of carbon labeling experiments