

## ИЗБОР ТИПА НАСУТЕ БРАНЕ ПРИМЕНОМ ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ

Проф. др Љупчо ПЕТКОВСКИ  
Грађевински факултет у Скопју,  
Универзитет Св. Кирил и Методиј, Република Македонија

### РЕЗИМЕ

Код пројектовања хидротехничких објеката у саставу водопривредних система са акумулацијама, један од најзначајнијих и најсложенијих инжењерских проблема је избор оптималног типа бране. Овај инжењерски задатак се решава у оквиру Идејног пројекта, након усвајања оптималних физичких параметара система у Водопривредној студији, где је кључни параметар величина корисне запремине, односно висина нормалног нивоа акумулације. Приликом припреме Пројектог задатка за идејни пројекат, анализом доступних подлога (геотехничке, топографске, хидролошке, климатске) одређују се могуће врсте брана, које су актуелне за разматрани профил бране. На тај начин, применом експертског знања у домену хидротехничких објеката, дефинише се обим и квалитет прорачуна при одабиру оптималног типа бране, чиме се правилно усмерава и ограничава пројекат.

У овом раду, поступак за избор оптималног типа бране је илустрован резултатима истраживања бране "Речани" - Кочани, Р.Македонија. Ови резултати су добијени коришћењем стандардне техничко-економске анализе, а затим су проверене вишекритеријумском оптимизацијом. Техничко-економска анализа је скаларна оптимизација, која користи један критеријум - "минимизирање инвестиција". За правилну примену скаларне оптимизације морају бити испуњени следећа два услова за све врсте брана: (а) да буду на истом прагу техничке испитаности, и (б) да имају исти ниво конструктивне (статичке и сеизмичке) и филтрационе сигурности. Савремени приступ планирања великих инфраструктурних система у хидротехници захтева да најрационалније решење за тип бране (добијено скаларном оптимизацијом) буде проверено у смислу векторске оптимизације. У

векторској оптимизацији, поред економског, треба да буду укључени већи број различитих критеријума (мерљивих и немерљивих), који су релевантни за структуру оптимизационог проблема. Услови које треба испунити за примену векторске оптимизације су: (а) све варијанте да буду на истом прагу истраживања, и (б) да све варијанте буду вредноване по свим усвојеним критеријумима.

**Кључне речи:** насуте бране, техничко-економска анализа, вишекритеријумска оптимизација.

### 1. УВОД

Традиционални приступ у планирању хидросистема и пројектовању хидротехничких објеката примењује стандардну техничко-економску анализу са критеријумом "максимизација нето добити" или "минимизација трошкова". Ова конвенционална процедура је скаларна оптимизација, јер користи само један критеријум - углавном економске природе. За правилну примену скаларне оптимизације морају бити испуњена следећа два услова за све варијанте: (а) да буду на истом нивоу пројектне истражености, и (б) да имају исти ниво функционалне сигурности (за системе) и конструктивне стабилности (за објекте). Досадашња пракса је показала да решења за развој водних ресурса која су задовољавала само економски критеријум, уједно су жртвовала немерљиве вредности: еколошке, социолошке утицаје, услове за спорт и рекреацију (за хидросистема), а такође су игнорисала посебне критеријуме: осетљивост на секундарна оптерећења, изложеност на спољне утицаје, контролу квалитета, удобности при раду и одржавању објеката, вештине запослених и квалитет опреме на хидротехничким објектима.

У скорије време, ови недостаци код избора оптималне варијанте у хидротехничком планирању условљавају да се толеришу нека смањења економске ефикасности (у оквиру одређених граница и без угрожавања економске оправданости система), на рачун унапређења неких важних немерљивих вредности и задовољавања специфичних критеријума. Зато, тренутни приступ у планирању великих инфраструктурних система и објеката у хидротехници захтева да се најеконичније решење (добијено скаларном оптимизацијом) додатно испитује са становишта вишекритеријумске (или векторске) оптимизације. У векторској оптимизацији, поред економских, треба да буду укључени више различитих критеријума (мерљивих и немерљивих) који су релевантни за структуру оптимизационог проблема. Услови које треба испунити за примену векторске оптимизације су: (а) све варијанте треба да буду на истом прагу истражености, и (б) све варијанте треба да се вреднују по свим прихваћеним критеријумима. У даљем тексту, примена вишекритеријумске оптимизације у планирању хидротехничке инфраструктуре биће објашњена кроз поступак избора оптималног типа насуте бране.

Планирање водопривредног система (ВПС) са акумулацијом и пројектовање хидротехничких објеката у саставу хидро система - брана са пратећим објектима, садржи неколико фаза. У првој етапи - фаза Студије, за познате расположиве водне ресурсе и потребе водокорисника истовремено се одређују: (а) оптимални физички параметри система - запремина акумулације, капацитет водоснабдевања, површина за наводњавање, инсталирани проток хидроелектране, и (б) најбоља оперативна правила за регулисање протока (Petkovski, 2008). Ове две координате управљања треба да буду паралелно одређене, као резултат недељивости оптимизационог процеса. Или једноставније објашњење – само у случају када се управља по оптималним оперативним правилима са системом са оптималним физичким параметрима, задовољавају се потребе водокорисника, што је основни циљ ВПС – испуњавање функционалне сигурности хидросистема.

Након одређивања потребне запремине акумулације (или коте нормалног нивоа), прелази се у следећу етапу - фазу Идејног пројекта. У идејном пројекту треба да буде утврђено: оптималан тип бране и оптимално решење за пратеће објекте (прелив,

опточни тунел, темељни испуст, доводни орган). Диспозиција пратећих објеката у великој мери зависи од типа бране, дакле, коначни избор оптималних параметара брана са пратећим објектима, требало би да буде резултат једног јединственог оптимизационог поступка.

Брана је кључни елемент хидросистема, (Петковски, 2003), (Петковски, Танчев, 2004.), и у финансијском погледу и зато што је грађевински објекат који има највећу потенцијалну опасност за животну средину (Петковски, Танчев, 2002). Наиме, код евентуалног рушења бране долази до неконтролисаног и брзог пражњења акумулације, које генерише катастрофалан поплавни талас. Овај талас има много већи максимум протицаја од врха великих вода изазваним интензивним падавинама и површинским токовима. Пропагацијом катастрофалног таласа у низводној долини могуће су жртве, а материјална штета је обично вишеструко већа од губитка инвеститора на профилу бране. Због ових карактеристика бране као грађевинског објекта, заједно са геосредином испод бране, морају да испуне строге критеријуме конструктивне – статичке и динамичке стабилности (Petkovski, Tančev, Mitovski, 2007), (Petkovski, 2007), Петковски, Паскалов, 2004.) и филтрационе стабилности (Петковски, Танчев, Митовски, 2009.), док се хидролошка сигурност хидросистема обезбеђује опточним тунелом - током изградње, и преливним органом - у току коришћења (Petkovski, 2000.). У даљем тексту биће истакнути основни принципи при избору типа бране, са циљем - допринос у систематизовању овог комплексног инжењерског оптимизационог задатка. Разматрање ће бити илустровано резултатима анализе за одређивање оптималног типа насуте бране "Речани" - Кочани, Р.Македонија, у саставу хидросистема (ХС) "Оризарска Река".

## 2. ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ХИДРО СИСТЕМА "ОРИЗАРСКА РЕКА"

За развој општине Кочани, од виталног је значаја реализација ХС "Оризарска Река". У постојећој Водопривредној основи Републике Македоније предвиђена је изградња бране Речани на Оризарској реци и стварање вештачког језера. Акумулација Речани ће побољшати управљање водним ресурсима Оризарске реке, које ће обезбедити: (1) квалитетно водоснабдевање 90.000 становника у општинама Кочани, Чешиново-Облешево, Зрновци и Виница и

индустрије у овом региону, (2) повећану поузданост за наводњавање површина које су погодне за интензивну пољопривредну производњу - процењене на око 1.500 хектара, (3) производњу електричне енергије са три мале хидроелектране, (4) оплемењивање малих вода, (5) заштиту од поплавне воде, и (6) развој туризма, спорта и рекреације.

Овде треба нагласити "принцип надлежности" у планирању инфраструктурних система. Пракса је потврдила да се разграничење успешних од неуспешних пројеката у хидротехничкој инфраструктури у великој мери ослања управо на доследном поштовању наведеног принципа. Наиме, у планирању ХС разликују се два нивоа компетентности - ниво одлучивања и техничко ниво (Đorđević, 1990). Основни параметри усвојени на "нивоу одлучивања" се базирају на подацима из интензивног истраживања и пројектовања ХС Оризарска Река, у последње две - три деценије. Радна група општине Кочани за координацију пројекта у 2009 години је одлучила о фазном спровођењу овог вишенаменског водопривредног система, где су прве две фазе: (1) прилазни пут до профила Речани, и (2) хидрошвор Речани, који се састоји од бране са пратећим објектима. У складу са расположивим техничком документацијом, и за изабрани временски оквир за имплементацију ХС Оризарска Река, Доносиоц одлуке је усвојио следеће параметре хидрошвора Речани: (а) кота нормалног нивоа акумулације је 646,0 мнв, (б) локација профила бране је око 500 m низводно од ушћа Беле реке и Црну реку, и (в) на профилу да се разматра насута брана.

Дефинисањем кључних параметара ХС Оризарска Река на "нивоу одлучивања" добијени су основни параметри за пројектовање бране Речани са придруженим објектима на "техничком нивоу", које треба да добију повећану прецизност израдом Идејног пројекта:

- површина слива Оризарске река, на профилу Речани	92,5 km <sup>2</sup> ,
- приближна кота тла на профилу бране	575,0mнв,
- укупна запремина акумулације	23,0·10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ,
- приближне висине бране изнад тла	75,0 m,
- приближна дужина круне бране	198,5 m.

Прво питање које се појавља на "техничком нивоу" је - када је најделотворнија примена "хеуристичког знања" у области планирања хидротехничких објеката? Конкретније, у којој фази у процесу

израде техничке документације за велике инфраструктурне системе треба да буде примењено? Наиме, коришћењем експертског знања баш у састављању "Пројектног задатака" за израду Идејног пројекта може се правилно усмерити пројекат, да се ограничи обим пројектовања, и што је најважније, знатно да се утиче на квалитет решења. Тако, после усвајања основних параметара за бране Речани, коришћењем искуственог знања у вези са избором типа насуте бране, (Nonveiller, 1983), (Novak, 1990), (Танчев, 1999), (Танчев, 2005), био је наведен обим, методологија и квалитативни ниво Идејног пројекта.

У пројектни задатак за израду идејног пројекта било је усвојено да се разраде три типа бране: (1) камено-земљана са централним глиненим језгром, (2) каменонасута са асфалтном дијафрагмом, и (3) каменонасута са геосинтетичким екраном. Неопходно је било да се анализирају две врсте преливног органа слободним преливањем: (а) шахтни прелив, и (б) бочни прелив. Избор типа бране и врсте прелива усвојен је у складу са критеријумом - "минимизирање инвестиција", тако да сва алтернативна решења буду на истом прагу техничке истражености и да имају исти ниво конструктивне - статичке и сеизмичке, филтрационе, хидролошке и хидрауличке сигурности. Аспектима хидрауличке стабилности брана са разним типовима евакуационих органа бавили су се бројни аутори, у новије време (Hajdin, 2006), (Erčić, 2007), (Erčić, 2009), (Erčić, 2011). Различити модели филтрационог течења и транспорта у порозним срединама разматрани су и упоређивани у новијем раду (Samardžioska, Popov, 2007).

Поред ових техничких аспеката стабилности, без чијег остварења се не може реализовати поуздан објекат, при разматрању диспозиција пројектних решења веома су важни и други аспекти, од којих су најважнији аспекти економске и еколошке стабилности. Имајући то у виду, поред економске стабилности пројеката, који је увек био један од доминантних при избору варијанте пројектних решења, у задњим деценијама се у скуп критеријума уводе и бројни други показатељи, који постају важни при избору диспозиције објеката брана и хидротехничких система. Пошто се стално повећавао број критеријума по којима поред економских показатеља треба валоризовати пројектно решење бране, прешло се на концепт

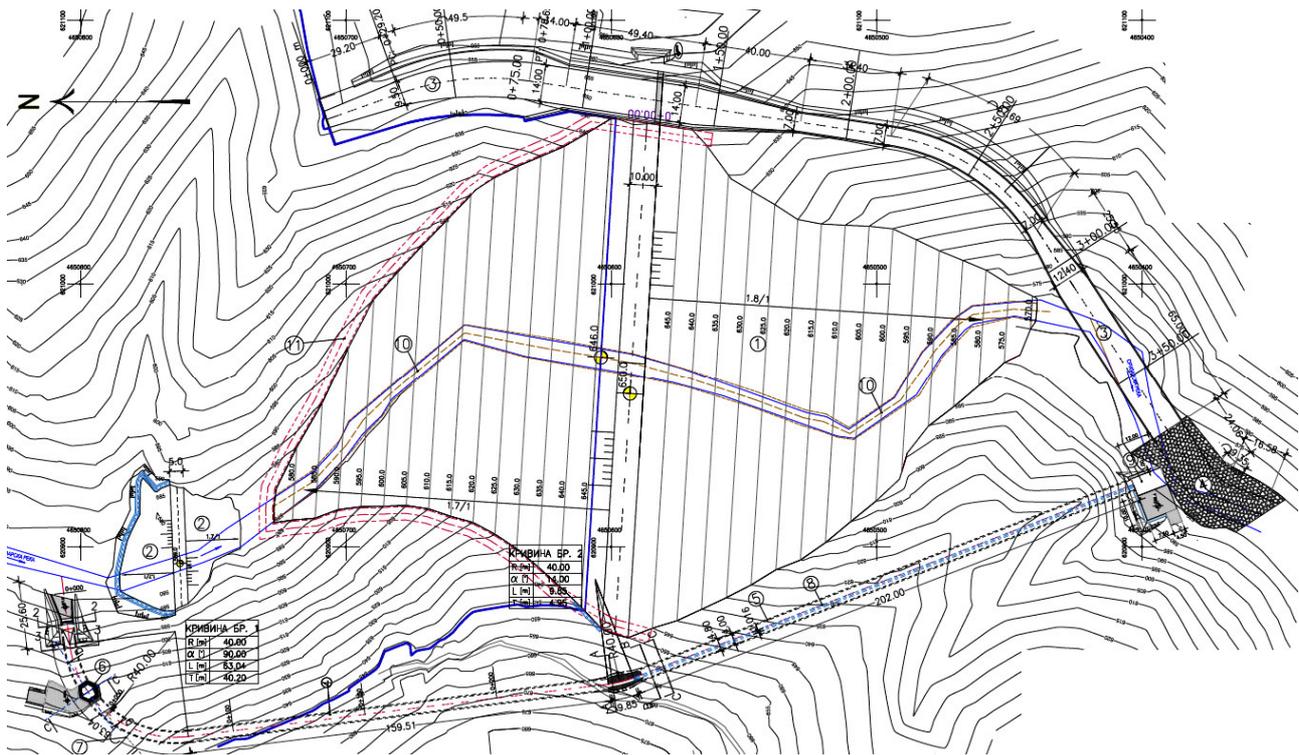
вишекритеријумске оптимизације (Opricović, 1986). Због тога је неопходно да се сва пројектна решења брана оптимизирају и на тај начин, уводећи у разматрање разне мерљиве и немерљиве индикаторе који су битни у процесу избора варијанте. То је учињено и у случају избора пројектног решења бране "Речани" ХС "Оризарска Река".

### 3. ДИСПОЗИЦИЈА, ТИП И ПАРАМЕТРИ ПРАТЕЋИХ ОБЈЕКТА

За заштиту грађевинске јаме током изградње, у складу са хидролошким, геолошким и топографским условима, како и са врстом бране – насутом, усвојен је метод скретања воде из постојећег корита реке. За скретање дотока у току градње предвиђен је спој два објекта: опточни тунел и узводна предбрана. Усвојено је да узводна предбрана буде независна насута конструкција, лоцирана узводно од тела

бране. Овај избор је направљен за варијанту бране са екраном, са циљем да водонепропусни елемент бране не буде део привременог објекта, без обзира што постављање предбране изван тела бране повећава дужину опточног тунела.

Топографија у области профила бране условљава да леви бок буде заузет преливним органом, чиме се добија најповољнији правац крајњег објекта за уништавање енергије преливног протицаја. Истовремено, топографски услови, односно закривљеност корита у ситуацији са конвексним делом на десној обали корита реке, условљава да опточни тунел буде позициониран у десном боку долине. Ово обезбеђује минималну дужину опточног тунела, задовољавајући брдски надслој, и минимизирање потеза који треба да буде у кривини (слика 1).



Слика 1. Ситуација бране Речани са пратећим објектима. (1) тело бране са круном на 650 мнв, (2) узводна предбрана, (3) преливни орган (сабирни канал бочног прелива на 646 мнв, брзоток и слапиште), (4) ризберма, (5) опточни тунел, (6) захватна кула, (7) приступни мост, (8) челични цевовод, (9) затварачница, (10) дренажни тепих, (11) инјекциона галерија

Код димензионисање опточног тунела анализирана је могућност преадаптације тунела у фази коришћења ХС Речани, тако да се користи као доводни орган, и уједно и као темељни испуст (*Градежен факултет – Скопје, 2011, 05*). Изабрани положај обезбеђује да се део тунела користи као темељни испуст, након уградње средишног бетонског чепа, а у низводној секцији биће монтиран челични цевовод, који се завршава затварачем темемелног испуста (за инцидентно, делимично или потпуно прањење акумулације). Темељни испуст, код нормалног коришћења ХС Речани, ће се користити као део доводног органа за приоритетне водокориснике (водоснабдевање, еколошки гарантовани проток и наводњавање), и за енергетско коришћење водне снаге. За ову сврху, у близини улазног потеза, опточни тунел кроз вертикалну шахту биће повезан са захватном кулом. Предности вишенаменске захватне куле, која је истовремено улазна грађевина доводног органа за будуће водокориснике и захватна грађевина темељног испуста, су следеће:

- (а) захватање површинских вода од минималног радног нивоа 610,0 мнв, до коте нормалног нивоа 646,0 мнв (што је важно за наводњавање),
- (б) потпуно затварање дотока (у почетном периоду преадаптације опточног тунела у темељни испуст),
- (в) одржавање ниског нивоа у акумулационом базену (у периоду преадаптације),
- (г) контролисано испуштање (за прањење динамике првог пуњења акумулација),
- (д) нагло смањење нивоа у резервоару (код инцидентног коришћења темељног испуста у периоду експлоатације),
- (ђ) обезбеђивање сталне расположивости (како у време преадаптације тунела, тако и току првог пуњења акумулације) уређаја за манипулацију затварачима захватне куле, на платоу на коти круне бране на 650 мнв.

За димензионисање прелива усвојен је поплавни талас са екстремно малом вероватноћом појаве  $p = 0,01\%$ , односно за период понављања од  $T = 10.000$  година. У анализи ретензионе способности вештачког језера, примењен је хидролошки модел - преко водног биланса резервоара. У хидрауличкој анализи прелива, усвојена је величина коефицијента преливања  $m = 0,46$  у случају бочног (или шахтног) прелива, и одређена је дужина преливања, која обезбеђује потребну преливну висину  $H_p = 2,0$  m.

Дакле, потребна дужине преливања је  $L = 78,7$  m, у складу са критеријумом – да максимални ниво у резервоару не прелази  $K_{\max} = 648,0$  мнв. Меродавни проток за пројектовање преливног органа је  $Q_{\max}^{PR} = 467,5$  m<sup>3</sup>/s, односно ретензиони капацитет резервоара је око 90%.

Анализирана су два типа прелива – шахтни и бочни, које у низводном делу настављају са следећим објектима: брзоток, слапиште и ризберма. Предвиђени су класични објекти за дисипацију енергије водне струје, јер низводно је лоцирана затварачница темељног испуста. Обе разматране варијанте преливног органа су на истом нивоу пројектне истражености, а од техничког аспекта, имају исту хидрауличку сигурност. Коштање варијанте са шахтним преливом је 9,6 милиона €, док варијанта са бочним преливом износи 4,2 милиона € (*Градежен факултет – Скопје, 2011, 08*). Зато је у следећој фази пројектне документације - изради Основног пројекта за брану Речани са пратећим објектима – усвојено решење са бочним преливом.

#### 4. АНАЛИЗА СТАБИЛНОСТИ БРАНЕ

Да се формира вештачко језеро са котом нормалног успора  $K_{NN} = 646,0$  мнв, неопходно је да се изгради насута брана, чија ширине круне је  $b = 10,0$  m, а ката круне насипа износи  $K_{KR} = 650,0$  мнв. Дужина бране по осовини профила је  $L = 202,0$  m. У осовини попречног пресека, ката тла је  $K_{TE} = 573,0$  мнв, а ката стенске основе је  $K_{KO} = 570,0$  мнв. Висина бране изнад терена износи  $H = 650 - 573 = 77,0$  m, а конструктивна висина (или висина бране изнад стене) је  $H_K = 650 - 570 = 80,0$  m (*Градежен факултет – Скопје, 2010, 12*).

У фази Идејног пројекта, прихватљиво је да нагиби косина насутих брана буду одређени коришћењем Метода Граничне Равнотеже (МГР), за следећа стања оптерећења: (1) пуна акумулација до коте нормалног нивоа, (2) непосредно после изградња, (3) нагло смањење нивоа у акумулацију, и (4) деловање земљотреса за пун базен. У складу са примењеним методом за анализу стабилности, усвојене су уобичајене величине неопходних коефицијената сигурности:  $F = 1,3$  - за повремено оптерећење,  $F = 1,5$  - за стално оптерећење, и  $F = 1,1$  – за ефекат земљотреса, са коефицијентом сеизмичности за катастрофалну побуду  $K_C = 0,11$ . Од топографског аспекта, профил бране је веома

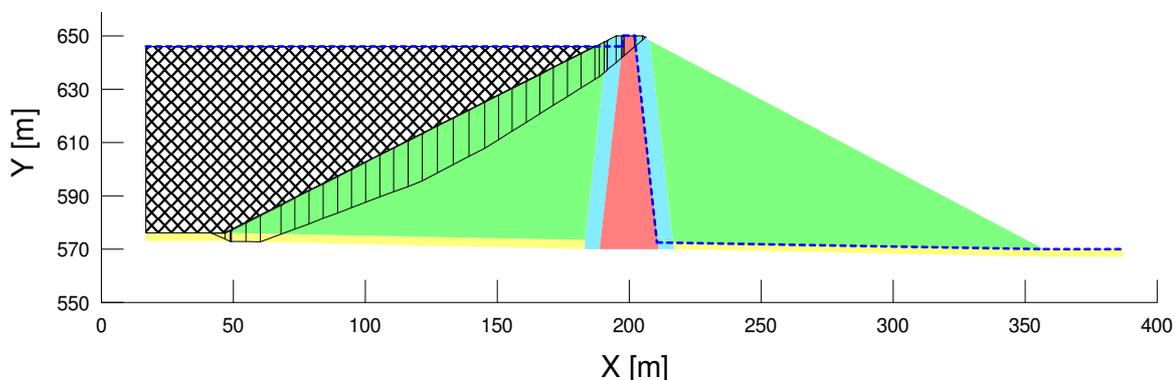
узак,  $L/H = 202/77 = 2,62$ , и може се очекивати повољан ефекат на стабилност насуте бране, који се не може предвидети са 2-Д анализом максималног попречног пресека, и применом МГР.

У анализи стабилности три варијанте насуте бране коришћени су услови равнотеже потенцијалних клизних тела, и третман међуламерних сила, у складу са формулацијама аутора *Fellenius, Janbu, Bishop u Morgenstern-Price*. Анализиране су клизне површине кружног и полигоналног облика, за карактеристична стања оптерећења бране током изградње и експлоатације, за моделе конструкције са различитим нагибима косина (1: m), у интервалу за хоризонталну димензију  $m = 1.7 \div 2.1$ . Од анализе добијених резултата за конструктивну и филтрациону сигурност насутих брана могу бити издвојени следећи закључци:

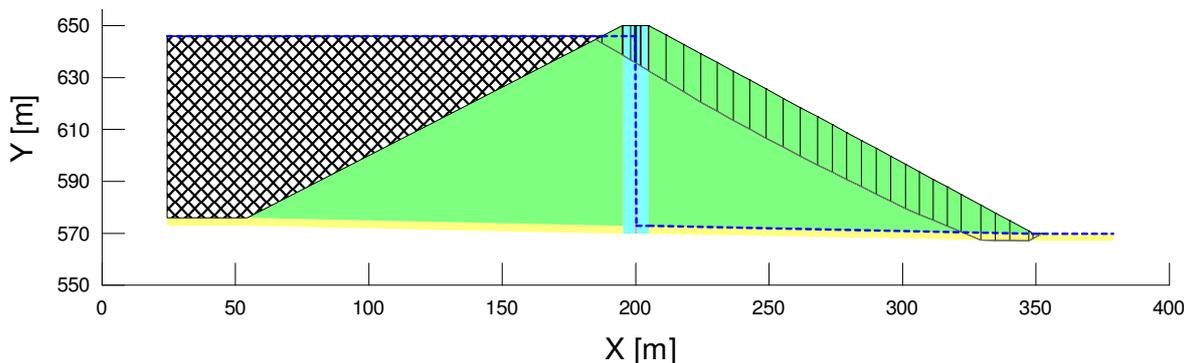
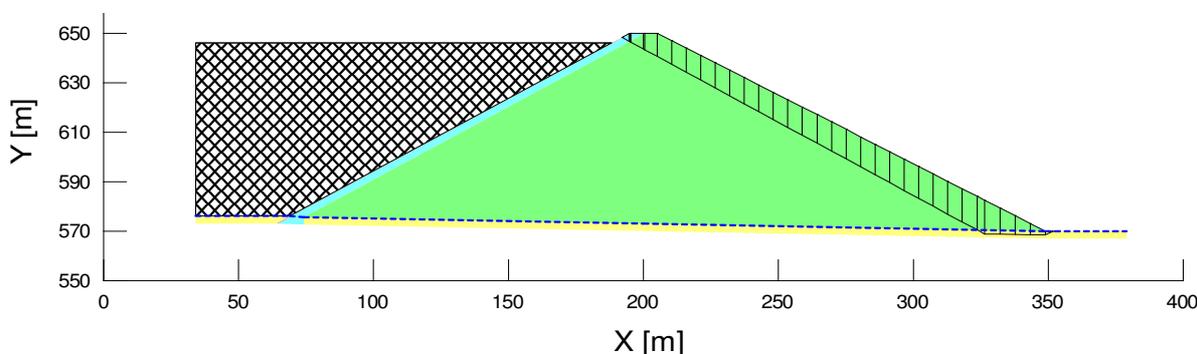
1. Неопходни нагиби каменоземљене бране са централним глиеним језгром су: узводни  $m_1 = 2,0$  и низводни  $m_2 = 1,9$ . Критично стање оптерећења, меродавно за нагиб низводне косине је стање пуне акумулације, где се добија коефицијент сигурности  $F = 1,503 \approx 1,5 = 1,5 = F_{DOZ}$ . Критично стање оптерећења, меродавно за нагиб узводне косине је стање код земљотресне побуде, где се добија коефицијент сигурности  $F = 1,021 \approx 1,0 < 1,1 = F_{DOZ}$ , слика 2.
2. Анализом филтрације кроз тело каменоземљене бране је потврђена филтрациона стабилност конструкције. За усвојене величине језгра, ширина у основи од  $d_2 = 22,0$  m, и однос  $d_2/H_w = 0,29$ , израчунати су максимални хидраулички градијенти:  $i = 5,8$  (по емпириском методу) и  $i = 4,0$  (по нумеричком методу, применом метода коначних елемената, МКЕ). Величине градијената

су мање од дозвољене величине  $i^{DOZ} = 6,0$ , чиме се може закључити да није нарушена казуална филтрациона јакост језгра каменоземљене бране.

3. Потребни нагиби каменонасуте бране са централном асфалтном дијафрагмом су: узводни  $m_1 = 1,9$  и низводни  $m_2 = 1,8$ . Критично стање оптерећења, меродавно за нагиб низводне косине је стање пуне акумулације, са коефицијентом сигурности  $F = 1,497 \approx 1,5 = 1,5 = F_{DOZ}$ , слика 3. Критично стање оптерећења, меродавно за нагиб узводне косине је ефекат земљотреса, где се добија коефицијент сигурности  $F = 0,991 \approx 1,0 < 1,1 = F_{DOZ}$ .
4. Неопходни нагиби косина у варијанти каменонасуте бране са геосинтетичким екраном су: узводни  $m_1 = 1,7$  и низводни  $m_2 = 1,8$ . Критично стање оптерећења, меродавно за нагиб низводне косине је стање пуне акумулација, са коефицијентом сигурности  $F = 1,489 \approx 1,5 = 1,5 = F_{DOZ}$ , слика 4. Што се тиче стабилности, узводна косина може да се уради много стрмије од нагиба 1,7. Међутим, због комфора у току израде геосинтетичког екрана, као и слоја испод екрана од порозног бетона, и заштита екрана од бетонских плоча, (који се постављају на изграђеној косини бране), усвојено је да се не сматра мањи нагиб од  $m_1 = 1,7$ .
5. Усвојеним методом - псеудостатички МГР, исцрпљене су процене сеизмичке отпорности насутих брана, уз оцену да нема потребе да се усвоје блажи нагиби. У будућем Основном пројекту, сеизмичка отпорност (усвојеног типа бране), треба да буде потврђена динамичким методом, где анализом у временском домену треба одредити трајне деформације под утицајем јаких земљотреса.



Слика 2.  $F_{BISHOP} = 1,021$ , критична клизна површина за брану са глиеним језгром

Слика 3.  $F_{\text{BISHOP}} = 1,497$ , критична клизна површина за брану са асфалтним дијафрагмомСлика 4.  $F_{\text{BISHOP}} = 1,489$ , критична клизна површина за брану са геосинтетичким екраном

## 5. ИЗБОР ОПТИМАЛНОГ ТИПА БРАНЕ

За идентификуване три варијанте насутих брана, одређено је најповољније решење у складу са стандарном техничко-економском анализом. То је варијанта бране са геосинтетичким екраном, са коштањем бране и ињекционих радова од 15,9 милиона € (Градежен факултет – Скопје, 2010, 12), односно око 2,1 милион € јефтиније од варијанте са асфалтним дијафрагмом. Најекономичније решење треба даље да се процењује да ли је оптимални тип бране - применом концепта вишекритеријумске оптимизације (ВКО).

Ни у Теорији оптимизације ни у пракси планирања не постоје техничка решења које истовремено задовољавају све критеријумске функције, тако да је уведен појам "неинфериорног решења". Неинфериорно решење је - ако не постоји неко друго решење које је истовремено боље по свим критеријумима. Одређивањем скупа неинфериорних решења заправо се решава математички проблем одређивања векторског максимума. Затим, у

оптимизациони поступак треба да се унесе "структура преференције", која ближе формализира жеље "Доносиоца одлука", и тада решење се зове супериорно или "преферирано оптимално" решење. Од бројних метода ВКО, у овом задатку је коришћен метод компромисног програмирање (Opricović, 1986).

Као мера удаљености  $j$ -те варијанте до идеалне алтернативе уводи се следећа метрика, која се зове функција компромисног програмирање (КП):

$$R_{(j,p)} = \begin{cases} \left\{ \sum_{i=1}^n (d_{ij})^p \right\}^{1/p} & ; 1 \leq p < \infty \\ \max_i (d_{ij}); & p = \infty \end{cases} ; j = 1, m \quad (1)$$

Решење КП је минимизирање одступања од идеалне варијанте, укључујући све критеријуме:

$$R_{(p)} = \min_j R_{(j,p)} \quad (2)$$

Када су критеријумске функције хетерогене, са различитим мерама за вредновање (новац, вероватноће ризика, квантитативне оцене еколошких или социјалних утицаја, оцене погодности одржавања објеката, итд., тада је неопходно њихово претварање у бездимензионалне функције  $d_{ij}$ . Ове бездимензионалне функције, са вредностима у интервалу  $(0 \div 1)$ , добијене су дељењем одступања од најбољих вредности са дужином интервала вредности. Дужина интервала је прорачуната као разлика између "најбоље" и "најгоре" вредности критеријума.

Параметар "р" (једн.1) има улогу „балансирајућег фактора“ између групе корисности ( $p=1$ , стратегија већине) и максималног појединачног одступања ( $p=\infty$ , стратегија консензуса). Постављањем више вредности "р" добија се смањени скуп неинфериорних алтернатива (подскуп скупа алтернатива у простору критеријумских функција), чиме се решава проблем вишекритеријумске оптимизације.

Први корак у ПКО је избор критеријума које су меродавне за одређивање оптималне варијанте. У овом оптимизационом задатку усвојени су следећи критеријуми (мерљиви и немерљиви):

1. ИНВЕСТИЦИОНО УЛАГАЊЕ. Овај критеријум се мери - у милионима еура (М€) и има доминантан утицај у избору најбољег типа бране.
2. УТИЦАЈ НА ЖИВОТНУ СРЕДИНУ. Овај критеријум је немерљив (изражен као оцена), али има непроцењив утицај, а самим тим и највећу величину пондерације. У овом оптимизационом задатку, потребно је дестимулисати решење које умањује природни земљишни фонд за развој пољопривреде. На пример, експлоатација лежишта глиновитог материјала, са просечном дужином од 3,5 m, за обим глинеог језгра од 85.170 m<sup>3</sup>, неповратно ће уништити пољопривредну површину од 24.334 m<sup>2</sup>.
3. БЕЗБЕДНОСТ ОД ПОЈАВЕ ХИДРАУЛИЧКОГ ЛОМА ВОДОНЕПРОПУСТЉИВОГ ДЕЛА КОНСТРУКЦИЈЕ БРАНЕ (ВНТ). Овај критеријум је немерљив (изражен као оцена) са методама стабилности које се примењују у овом идејном пројекту. Међутим, ако узмемо у обзир велики нагиб бокова долине, може да се очекује феномен - да меко глинеог језгро "виси" на крутој стеновитој основи. Овај неповољан и интензиван пренос оптерећења, за

стање пуне акумулације (са максималним хидростатичким притиском), може да изазове хидраулички лом водонепропусног језгра, што би изазвало прогресивну филтрацију кроз тело бране и њен колапс као грађевинске конструкције.

4. СТАБИЛНОСТ ОД ЗАМЉОТРЕСНОГ ОШТЕЋЕЊА ВНТ. Овај критеријум је немерљив (изражава се као нумеричка оцена), након псеудо-статичке анализе примењене у Идејном пројекту. Међутим, треба имати у виду да би и најмањи облик пуцања ВНТ од вештачког материјала (асфалт или геомембрана) у зони дубљој од нормалног нивоа у резервоару, имало разорније последице од појаве "хидрауличког лома" у језгру глинеог материјала.
5. ГРАДЊА ДОМАЊОМ ГРАЂЕВИНСКОМ ОПЕРАТИВОМ. Овај критеријум, у овом пројекту, се третира као немерљив (изражен је оценом), са циљем да се фаворизује решење које може тренутно бити у потпуности реализовано домаћом грађевинском оперативом.
6. ГРАЂЕЊЕ ИЗГРАДЊЕ. За овај мерљив критеријум (изражен у месецима) у идејном пројекту нису урађене додатне калкулације, већ се процењује у складу са локацијом бране и утицаја временских прилика на динамику изградње.

За примену КП, потребно је варијанте да буду познате у простору критеријумских функција, односно да биде одређена матрица  $[f_{ij}]$ , где  $f_{ij}$  је величина  $i$ -тог критеријума ( $i = 1, n$ ) за  $j$ -ту варијанту ( $j = 1, m$ ), табела 1 (K – критеријум, V – варијанта,  $j=1,2,3$ ).

Табела 1. Матрица величина критеријума  $\{i = 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  за варијанте:  $j=1$  – са глинеог језгром,  $j=2$  – са асфалтном дијафрагмом,  $j=3$  – са геосинтетичким екраном

K \ V	j=1	j=2	J=3
i=1	18,173	18,049	15,928
i=2	3,0	4,5	5,0
i=3	2,0	4,5	5,0
i=4	5,0	4,0	2,0
i=5	5,0	3,5	4,0
i=6	24,0	14,0	12,0

Вредности функције КП за различите величине балансног фактора су системазовани у табели 2, где су минималне вредности подељане.

Табела 2. Решење КП за баласирајући фактор  $\{p = 1, 2, 3, 4, \infty\}$ , и за варијанте  $\{j=1, 2, 3\}$ 

p	j=1	j=2	j=3
1	4,000	2,861	<b>1,667</b>
2	2,000	1,457	<b>1,202</b>
3	1,587	1,240	<b>1,090</b>
4	1,414	1,161	<b>1,046</b>
$\infty$	1,014	<b>1,000</b>	<b>1,000</b>

За постављени оптимизациони задатак, задавањем више вредности "p" добија се умањен скуп неинфериорних алтернатива (подскуп скупа варијанти), који се састоји од варијанте бр. 3 (у складу са стратегијом већине), и две једнаке варијанте - бр. 2 и бр. 3 (у складу са стратегијом консензуса). Тиме је решен проблем вишекритеријумске оптимизације и добија се да је оптимална варијанте бр. 3, а финална селекција неће зависити од преференције "доносиоца одлуке". Допунске анализе, убацивањем тежине различитих критеријума – за анализу осетљивости решења, као и са увођењем ентропије тежина критеријума, не изазивају промене на редуковани скуп неинфериорних алтернатива.

Из спроведених анализа са КП се потврђује да је најповољнији тип насуте бране варијанта  $j = 3$ , односно камена насута брана са узводним геосинтетичким екраном. Са иновираним економском анализом (*Градежен факултет – Скопје, 2011, 08*), трошкови хидроцвора Речани - брана са пратећим објектима за алтернативу бране са екраном од геосинтетике, износе 24,9 милиона €, док је варијанта са асфалтним дијафрагмом је 2,0 милиона € скупља. То је разлика у инвестиционим улагањима између варијанти  $j=2$  и  $j=3$ , за које је израђена векторска оптимизације и одређена оптимална варијанта.

## 6. ЗАКЉУЧАК

Бране су кључни елементи хидросистема, како са финансијског становишта, тако и због чињенице да су грађевински објекти са највећем потенцијалном опасношћу за околину. Зато је избор оптималног типа бране један од најважнијих и најсложенијих инжењерских задатака у пројектовању хидротехничких објеката. У овом раду су издвојени основни принципи при избору типа насуте бране, са циљем да се допринесе систематизовању поступака за решавање овог комплексног инжењерског

задатак. У комплетирању поступка за избор типа бране, одговарајућу пажњу треба посветити принципу компетенције и експертског знања у области планирања хидротехничких објеката. Наиме, доследном применом принципа надлежности дефинишу се основни физички параметри хидросистема, а применом експертског знања у креирању пројектног задатка правилно се усмерава пројекат. На тај начин се добијају основне претпоставке за примену савремених приступа у планирању великих хидротехничких инфраструктурних система. Савремени приступ захтева - најрационалније решење типа бране (добијено скаларном оптимизацијом) треба да буде проверено применом векторске вишекритеријумске оптимизације. Условне које треба испунити за примену вишекритеријумске оптимизације су: (а) све варијанте треба да буду доведене на исти праг истражености, и (б) све варијанте треба да буду вредноване по свим усвојеним критеријумима. Ово истраживање је илустровано резултатима анализе за одређивање оптималног типа насуте бране "Речани", у саставу хидросистема "Оризарска река" - Кочани, Р.Македонија. Из урађених анализа применом компромисног програмирање, потврдило се, да је за посматрани профил најбољи тип бране камена насута брана са геосинтетичким екраном.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Градежен факултет – Скопје, (2010, 12): Техничка документација за брана "Речани" на Оризарска Река со придружни објекти, Дел 1 – Идеен проект за избор на тип на насипна брана и оптимално техничко решение со диспозиција за придружните објекти, Книга 1 – Насипна брана, Петковски Љ. (одговорен пројектант) и други.
- [2] Градежен факултет – Скопје, (2011, 05): Техничка документација за брана "Речани" на Оризарска Река со придружни објекти, Дел 1 – Идеен проект за избор на тип на насипна брана и оптимално техничко решение со диспозиција за придружните објекти, Книга 2 – Придружни објекти, Петковски Љ. (одговорен пројектант) и други
- [3] Градежен факултет – Скопје, (2011, 08): Извештај по записникот од ревизијата на брана "Речани" со придружни објекти, Дел 1 – Идеен проект за избор на тип на насипна брана и оптимално техничко решение со диспозиција за

- придружните објекти, Книга 1 – Насипна брана и Книга 2 – Придружни објекти, Петковски Љ. (одговорен пројектант) и други
- [4] Đorđević B., (1990): Vodoprivredni sistemi, Beograd, Naučna knjiga
- [5] Erčić, Ž. (2007): Pregled i primena rezultata savremenih hidrauličkih istraživanja u projektovanju preliva visokih brana, časopis Vodoprivreda, II deo, 228, str. 181-205
- [6] Erčić, Ž. (2009): Pregled i primena rezultata savremenih hidrauličkih istraživanja u projektovanju preliva visokih brana, časopis Vodoprivreda, III deo, 237-239, str. 47-61
- [7] Nonveiller E., (1983): Nasute brane, Zagreb
- [8] Novak P., Moffat, Nalluri, Narayanan, (1990): Hydraulic structures, London, UK
- [9] Opricović S., (1986): Višekriterijska optimizacija, Građevinski fakultet, Beograd
- [10] Petkovski L., (2000): Development of an Information System for Flood Defences using a Simulation Model for Operational Management, paper, International Conference on River Flood Defence, September 20-23, Kassel, Germany, Proceedings Vol.1, D65-D73
- [11] Петковски Љ. и Љ. Танчев (2002): Влијание на акумулациите врз природните и вештачките поплавни бранови, реферат, Советување на тема: Загрозеност на РМ од природни и технички катастрофи и современа превенција, во организација на: Научна установа СИБН, Градежен факултет и Фонд за води на РМ, јули 02, Скопје, Зборник 23-38;
- [12] Петковски Љ., (2003): Браните и акумулациите во Законот за води на Р.Македонија, реферат, IX Советување за Водостопанството во Република Македонија, октомври 23-25, Охрид, Зборник, p. 035-046
- [13] Петковски Љ. и Т. Паскалов (2004): Определување на перманентни поместувања кај земјени брани под дејство на земјотрес, реферат, I конгрес на Македонскиот комитет за големи брани, октомври, Охрид, Зборник, "Evaluation of the permanent displacements of earth-fill dams subjected to strong earthquakes", I Congress of the Macedonian Committee on Large Dams, October, Ohrid, Proceedings, p.37-44;
- [14] Петковски Љ. и Љ. Танчев (2004): Основни поставки на современиот пристап за статичка анализа на насипни брани“, реферат, I конгрес на Македонскиот комитет за големи брани, октомври, Охрид, "Basic principles of modern approaches to static analysis of earth filled dams", I Congress of the Macedonian Committee on Large Dams, October, Ohrid, Proceedings, p. 25-36
- [15] Petkovski L., Tančev L. i S. Mitovski (2007): A contribution to the standardisation of the modern approach to assessment of structural safety of embankment dams, 75th ICOLD Annual Meeting, International Symposium "Dam Safety Management, Role of State, Private Companies and Public in Designing, Constructing and Operation of Large Dams", 24-29 June 2007, St.Petersbourg, Russia, Abstracts Proceedings p.66, CD-ROM
- [16] Petkovski L., (2007): Seismic Analysis of a Rock-filled Dam with Asphaltic Concrete Diaphragm, paper, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 25-28 June 2007, Thessaloniki, Greece, paper #1261, CD-ROM
- [17] Petkovski L., (2008): Application of contemporary simulation models for management of water resources systems, Third International Scientific Conference BALWOIS 2008, 27-31 May 2008, Ohrid, Republic of Macedonia, CD-ROM
- [18] Петковски Љ., Танчев Љ. и С. Митовски (2009). Статичка анализа на насипи брани на нестеновита основа, реферат, II конгрес на Македонскиот комитет за големи брани, мај, Струга, Зборник, "Static analysis of embankment dams on non-rock foundation", II Congress of the Macedonian Committee on Large Dams, May, Struga, Proceedings, p. 65-74;
- [19] Samardzioska, T. i V. Popov (2007): Numeričko upoređivanje konceptualno različitih modela protoka i transporta u poroznoj sredini, časopis Vodoprivreda, 225-227, str. 3-16
- [20] Танчев Љ., (1999): Брани и придружни хидротехнички објекти, Скопје
- [21] Tančev, L. (2005): Dams and Appurtenant Hydraulic Structures, London, UK
- [22] Hajdin, G. (2006): Uslovi i uputstva za hidraulički račun sabirnog kanala u koga voda preliva sa njegovog boka, časopis Vodoprivreda, 222-224, str. 163

## SELECTION OF TYPE OF EMBANKMENT DAM USING THE MULTI CRITERIA OPTIMISATION

by

Ljupcho PETKOVSKI, PhD, CEng, Prof.  
Faculty of Civil Engineering in Skopje,  
University Sts Cyril and Methodius, R. Macedonia

### Summary

At designing of hydraulic structures of water resources systems with reservoirs one of the most complex and most important engineering problems is the choice of optimal type of dam. This engineering task is being solved in the frames of the Preliminary design, after the adoption of the optimal physical parameters of the system done in the water economy analysis, where key parameter is the useful storage, apropos normal water level. At preparation of the Project assignment with analysis of available data (geotechnical, topographic and climate) are identified possible types of dams actual for the specific dam site. In that manner with application of expert knowledge in the domain of hydraulic structures is defined the volume and quality of the calculations at the choice of optimal type of dam, thus leading to properly directed and bounded project.

In this paper the procedure for choice of optimal type of dam is illustrated with results from the research for dam Rechani, Kochani, Republic of Macedonia. These results are obtained with application of standard technical-economic analysis afterwards checked with

multi criteria optimization. Technical-economic analysis is scalar optimization with use of one criterion – “minimum investment”. For precise application of the scalar optimization following two conditions must be fulfilled for all dam types: 1) same level of technical analysis and 2) same level of structural and seepage safety. The advanced approach in planning of the capital infrastructure systems in hydrotechnics prompts the most rational solution for type of dam obtained with scalar optimization to be checked with vector optimization. In the vector optimization, beside the economic factor, a number of various criteria should be included (measurable and non-measurable), relevant for the structure of the optimization task. The conditions that should be fulfilled for application of the vector optimization are: 1) all types to be on same level of analysis and 2) all types to be ranged on all adopted criteria.

Key words: embankment dam, technical-economic analysis, multi-criteria optimization.

Redigovano 25.07.2012.