



## БРАНЕ КАО ИНЖЕЊЕРСКИ ОБЈЕКТИ – ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ БРАНЕ ТИСА DAMS AS ENGINEERING OBJECTS – GEODETIC MONITORING OF A TISA DAM

Милош Савић, Факултет техничких наука, Нови Сад

### Област – ГЕОДЕЗИЈА И ГЕОМАТИКА

**Кратак садржај** – У овом раду представљене су бране као инжењерски објекти, са припадајућим елементима и особинама. Наведени су узроци њиховог рушења. Обављено је геодетско осматрање високе бране Тиса, те обрада и анализа података на основу којих су изведени закључци о стабилности бране.

**Кључне ријечи:** бране, рушење брана, геодетско осматрање брана, брана Тиса, деформациона анализа

**Abstract** – This paper presents dams as engineering objects with its construction parts and characteristics. Main causes of dam failures are presented too. Geodetic monitoring of a high dam on Tisa river was conducted, so the process of data acquisition and the deformation analysis are explained as well.

**Keywords:** dams, dam failures, geodetic monitoring, high dam on Tisa river, deformation analysis

### 1. УВОД

Хидротехничке конструкције су сталне или привремене инжењерске конструкције које су стално или привремено у додиру са водом, помоћу којих се газдује водом и спречава њено разорно дјеловање.

Граде се у различитим климатским, хидролошким и геолошким условима и са разним намјенама, па због тога има више од стотину различитих типова хидротехничких конструкција [4]. Свакако један од најзначајнијих типова ових конструкција јесу бране.

Бране спадају у најстарије хидротехничке грађевине и међу најстарије грађевине уопште. Технологија пројектовања и изградње брана и даље напредује, мада се може рећи да је доживјела врхунац у првој половини двадесетог вијека. Сматра се да тренутно у свијету постоји око 300.000 брана, од којих је више од 58.000 такозваних високих брана. Брана ствара успор за контролисано захватање воде из водотока.

Такође, бране омогућавају концентрацију пада код прибранских хидроелектрана, а пад створен браном може се искористити и за гравитационо водоснабдијевање насеља, индустрије и других корисника, као и за одржавање нивоа потребног за пловидбу или рекреацију. Уз то, брана обезбјеђивањем неприкосновеног простора за прихватање поплавног таласа, омогућава ублажавање штета од поплава у низводном подручју [2].

### НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији је ментор био др Зоран Сушић ванр. проф.

### 2. БРАНЕ КАО ХИДРОТЕХНИЧКЕ ГРАЂЕВИНЕ

Брана је, дакле, хидротехничка конструкција која, у већини случајева, преграђује ријечну долину, стварајући узводно од себе вјештачко језеро – акумулацију. Пошто је брана грађевина која може да буде саграђена од различитих грађевинских материјала, као и да се вода која се сакупља у њеној акумулацији користи у различите сврхе, наметала се потреба за класификацијом брана [2].

#### 2.1. Подјеле и типови брана

Постоји више подјела брана на основу различитих критеријума, а у наставку су наведене само најважније.

Према начину преношења оптерећења бране се дијеле на: **гравитационе, лучне, контрафорне и комбиноване.**

Према материјалу од кога се граде, бране могу бити: **бетонске, насуте земљане, насуте камене, зидане, дрвене и металне.**

Према конвенцији Међународног удружења за високе бране (ICOLD), бране се по висини (величини) дијеле на: **високе и ниске.**

Под високим (великим), сматрају се бране чија грађевинска висина (од најниже коте темеља до круне) прелази 15 m. Високе бране могу бити и ниже од 15 m, ако им је дужина по круни већа од 500 m или стварају акумулацију већу од 100.000 m<sup>3</sup> или ако су им евакуациони органи димензионисани на протикајућу већи од 2000 m<sup>3</sup>/s [2].

#### 2.2. Основни елементи бране

У ужем смислу ријечи, брана је грађевина којом се преграђује ријечна долина. У ширем смислу, под браном се, поред грађевине за преграђивање, подразумевају и грађевине за евакуацију великих вода, за захватање и испуштање воде и друге тзв. пратеће грађевине.

Независно од типа, величине и намјене, већина брана има одређене „обавезне” елементе, а то су: **непреливни дио бране, евакуациони орган, узводно и низводно лице бране, умиривач енергије, темељни испуст, захват, темељ, круна бране, кота круне бране, дренажни систем, инјекциона завјеса.**

Поред њих, битно је споменути: акумулациони басен, објекте за скретање ријеке, управну зграду, нанос, као и: осу бране, грађевинску висину и дужину по круни бране [2].

### 2.3. Предности и мане појединих типова брана

#### Предности насутих брана:

1. Минимални захтјеви за услове фундаирања.
2. Прилагодљивост готово свим врстама терена.
3. Могућност коришћења разноврсног и хетерогеног материјала за насип.
4. Јефтино и брзо уграђивање.

#### Мане насутих брана:

1. Велика осјетљивост на преливање.
2. Велика осјетљивост на неконтролисано процуривање и испирање материјала.
3. Као последица прве двије мане, слиједи да су за евакуацију великих вода, као и за темељни испуст и захват потребни посебни бетонски објекти ван тијела насипа.
4. Велики обим радова усљед блажих косина узводног и низводног лица.
5. Кратка сезона радова на уградњи глине.

#### Предности бетонских брана су:

1. Значајна отпорност на преливање.
2. Утрошак мање количине материјала у односу на насуте бране, посебно код лучне бране.

#### Мане бетонских брана:

1. Високи захтјеви за услове фундаирања.
2. Висока јединична цијена – потреба набавке и допремања цемента и агрегата, релативно дуготрајан процес уграђивања при класичном бетонирању, који захтјева и знатно бројнију радну снагу, него у случају насутих брана.
3. Код лучних брана се, поред стабилности и високе носивости бокова и дна долине, захтјева још и одговарајући однос висине бране и ширине долине [1].

### 3. УЗРОЦИ РУШЕЊА БРАНА

Слом хидротехничке конструкције може настати због више узрока у зависности од тога који тип конструкције је у питању: погрешно пројектовање или у прорачуне погрешно унијети или узети разни параметри; недовољна истраженост неке од подлога неопходне за пројектовање; погрешни прорачуни – хидролошки, или хидраулички, или статички, или динамички; погрешно пројектовање или извођење антифилтрационих мјера, погрешно пројектовање темеља, слаб квалитет уграђеног материјала и слабо уграђивање материјала у конструкцију; плављење конструкције и одношење материјала испод конструкције; незавршена конструкција изложена пројектованом оптерећењу за завршену конструкцију; погрешне операције са хидромеханичком опремом и сл.

Често су концепт и хипотезе важнији од самог прорачуна, који практично и поред велике прецизности коришћења рачунара, ништа не вриједи ако је заснован на погрешним претпоставкама и подлогама [4]. Након само једне катастрофе у Индији, приликом пуцања бране Мачу наомак града Морвија, животе је изгубило преко 17.000 људи.

Поред поменуте катастрофе, позната су и рушења брана: Вајонт, Глено, Тетон, Малпасе, Тоус и многих других, у којима је животе изгубио велики број људи и при чему је настала огромна материјална штета.

### 4. ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ БРАНА

Усљед помјерања подтемељног тла које за последицу има слијегање темеља и деформацију саме конструкције, код свих већих и значајнијих грађевина, обично се још у току грађења почиње са анализом помјерања и деформација примјеном геодетских, геотехничких и других метода мјерења. Мјерења и испитивања ове врсте могу трајати дуже, као што је то случај код испитивања брана, гдје се испитивања изводе више година после завршеног грађења. Због тога је потребно, да се још у току израде грађевинског пројекта и пројекта обиљежавања објекта изради пројекат техничког осматрања базиран на примјени геодетских метода мјерења [1]. Геодетским методама осматрања одређују се просторне позиције контролисаних тачака на брани, на терену низводно и узводно од преградног профила, односно у ближој и даљој околини тачке. Геодетске методе осматрања изводе се: прије грађевинског захвата, у току изградње и у току коришћења бране тј. акумулације. Мјерења се изводе периодично у одређеним временским интервалима (нпр. у влажном и сушном периоду) и код одређених нивоа воде у акумулацији.

За сваку контролну тачку морају се одредити просторне координате  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  (Н). Хоризонтална позиција контролних тачака одређује се било тригонометријским пресецањем напријед или методом алинирања. Висинске разлике одређују се геометријским нивелманом или тригонометријским нивелманом на тачкама неприступачним за геометријско нивелање.

Пројекат бране мора обухватити и пројекат локалне микро–мреже, која мора одговарати потребама извођења радова и геодетској методи осматрања. Ова мрежа се састоји од референтног дијела и тачака на објекту. За стубове те мреже услов је да су стабилни и да нису под утицајем сила које се преносе браном и акумулираном водом. Контролне тачке на брани распоређују се на низводном лицу и круни бране. Распоред тачака мора бити усклађен са другим методама осматрања. Осматрање бране се заснива на главном пројекту који обухвата сва теоријска разматрања на основу статичког и динамичког прорачуна бране, моделованих испитивања и теренских истраживања [3].

### 5. БРАНЕ НА ПОДРУЧЈУ ОПШТИНЕ ГАЦКО

На територији општине Гацко постоје двије високе бране. Због своје висине, обје бране су предмет геодетског осматрања. То су: брана Клиње и брана Врба, обје на ријечи Врби.

#### 5.1. Брана Клиње

Брана Клиње је камена, зидана лучна брана (слика 1), изграђена 1898. током аустроугарске окупације БиХ, те представља најстарију лучну брану на Балкану. У вријеме изградње, са својих 26,4 m грађевинске висине, била је 7. највиша лучна брана на свијету. Првобитна намјена била је за потребе наводњавања Гатачког поља, међутим, након изградње ТЕ Гацко, акумулација је добила и другу намјену у виду снабдијевања ТЕ техничком водом [3, 4].

## 5.2. Брана Врба

Пошто акумулација Клиње није задовољавала потребе водоснабдијевања ТЕ Гацко, 800 m узводно од бране Клиње, 1982. године, у оквиру изградње ТЕ изграђена је и брана Врба (слика 1), како би се обезбиједило несматано функционисање блока ТЕ у сушном периоду. Брана Врба је насута брана изграђена од каменог набачаја (вађеног из оближњег каменолома), са узводним водонепропусним АБ екраном. Грађевинска висина ове бране износи 43,0 m [5].



Слика 1. Бране Врба и Клиње

## 5.3. Пројекти техничког осматрања брана

Геодетска осматрања брана Клиње и Врба вршена су од 1983. године, по тадашњим методама које немају добру поузданост. Међутим, како се данас у свијету користе нове методе анализе геометријских деформација брана и инжењерских објеката, знатно поузданије од раније коришћених, донијета је одлука да се ураде иновације техничког осматрања за обје поменуте бране.

Прегледом елабората геодетских осматрања брана од 1983. до 2010. године и поред чињеница да су тачке са којих се врши осматрање добро пројектоване и да су мјерења изведена врло квалитетно, уочени су следећи суштински недостаци: оптимизација контролне геодетске мреже није урађена, тако да има опажаних величина са коефицијентом унутрашње поузданости нула; стабилне тачке контролне мреже су *a priori* усвајане, тј. њихова стабилност није одређивана и провјеравана на основу геодетских мјерења по епохама мјерења; симултано статистичко закључивање, по тесту једнакости вектора положаја тачке, замијењено је закључивањима по тестовима појединачних компоненти (вектора положаја тачке) што није еквивалентно; за тестирање помјерања тачака нису коришћене оцјенљиве функције, што за последицу има вишезначност рјешења; моћ методе откривања помјерања тачака, (као последица примјене три претходна става ове тачке) је мала. Због тога се одређивање деформација и помјерања тачака брана овом методологијом почело у свијету напуштати седамдесетих година прошлог вијека, а нарочито после неких катастрофа на бранама, када је нагло порастао интерес за праћењем промјена геометрије брана геодетским методама које поуздано откривају настале деформације и помјерања тачака бране. Свакако једна од најзначајнијих јесте Пелцорова метода анализе геометријских деформација, те је она коришћена у поменутих иновацијама [6, 7].

## 6. ГЕОДЕТСКО ОСМАТРАЊЕ БРАНЕ „ТИСА“

Брана „Тиса“ налази се у близини Новог Бечеја, око 2 km низводно. У грађевинском смислу, ова брана је сложен хидротехнички објекат који се састоји од **преливних поља, моста и преводнице** (слика 2).

Основни технички подаци за брану на Тиси су:

- висина изнад темеља износи 25 m,
- дужина по круни бране износи 520 m и
- капацитет прелива износи 4750 m<sup>3</sup>/s.

Локални положајни координатни систем геодетске мреже бране на Тиси орјентисан је тако да је Х-оса управна на ток Тисе (са позитивним смјером ка лијевој обали) – **тангенијални правац**, док је Y-оса управна на осу Х (са позитивним смјером низводно) – **радијални правац**. Висински систем репера дефинисан је у Државном систему висина. Локалну микро-мрежу чини 20 тачака које имају ознаке од 1 до 20. Нивелманску мрежу чине стубови микро-мреже. Објекат је апроксимиран тачкама и реперима по следећим дијеловима: тијело (лице) бране, круна бране и мост и бродска преводница. Тијело бране апроксимирано је са 2 реда тачака (4. и 5. ред), при чему су на свакој ламели тијела бране уграђене по 4 тачке. Круна бране (2. и 3. ред) апроксимирана је са по 4 тачке на свакој ламели, док је мост апроксимиран са једним редом тачака и са по двије тачке у правцу ламела [8]. Предмет експерименталног дијела рада састоји се у 2Д (X, Y) осматрању тијела бране.



Слика 2. Низводно лице бране „Тиса“

### 6.1. Осматрање, обрада и анализа података

У досадашњем периоду, геодетска осматрања су вршена у неким контролним серијама у прољеће, а у неким у јесен. Мјерења су извођена при различитим условима (различитим водостајима и температурама). Друго што је значајно, поједине тачке и репери су уништавани и исти обнављани, тако да за све осматране тачке/репере није исти датум нултог мјерења. У августу 2019. године извршено је геодетско осматрање бране на Тиси према постојећем пројекту геодетског осматрања при следећим условима:

- водостај акумулације узводно – 75,20 m н. в.,
- водостај акумулац. низводно – 71,40 m н. в. и
- температура – од 22°C до 35°C.

Ово контролно мјерење обухватило је:

- **низводно лице бране на коти 86 m н. в.,**
- **низводно лице бране на коти 76,5 m н. в.,**
- круна бране низводно и
- бродска преводница.

За ГНСС (Глобални Навигациони Сателитски Систем) мјерења коришћени су уређаји марке Stonex, са прописно извршеним еталонирањем ( $\sigma_d = 3 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm}$ ). За мјерење дужина и опажане праваца коришћена је тотална станица Sokkia SET330R, са уредно извршеним еталонирањем ( $\sigma_p = 3''$  и  $\sigma_a = 2 \text{ mm} + 2$

ppm). Угловна мјерења извршена су гирусном методом у 2 гируса са присилним центрисањем инструмента. Инструмент је све вријеме био заштићен од директног утицаја сунчевих зрака. Обрада резултата ГНСС мјерења у положајној мрежи вршена је помоћу софтвера за ГНСС мјерења (Trimble Business Center, Trimble Total Control и MicroSurvey Star\*Net) на основу којих су добијене хоризонталне дужине, које су коришћене у комбинацији са подацима добијеним тоталном станицом како би се у поступку изравњања добиле дефинитивне координате.

Резултати мјерења изравнати су по методи најмањих квадрата, по функционалном и стохастичком моделу посредног изравњања по дијеловима објекта (лице бране, круна бране и преводница) како би се избјегао евентуални утицај корелације и како би се елиминисао утицај евентуалних неоткривених грубих грешака једне групе тачака на другу.

Идентификација грубих грешака у реализованим мјерењима извршена је примјеном *Data snooping* теста.

Спроведено је, дакле, слободно изравњање, као и Унимодална трансформација координата тачака ради одређивања стабилних тачака основне положајне мреже, а затим је извршена деформациона анализа по Карлсруе методи, тј. поређење добијених резултата са расположивим подацима из претходне серије мјерења (2017). Сва рачунања су спроведена у оквиру *open-source* софтвера JAG3D за изравњање и деформациону анализу геодетских мрежа. На основу извршених мјерења и обраде података дошло се до закључка да су тачке на тијелу бране, у положајном смислу, близу доње границе тачности мјерења, али да су добијена помјерања тачака сличног смјера као и у досадашњим контролним серијама, те да се сама мјерења изведена у оквиру пројектом прописаних вриједности.

У табели 1 приказани су резултати обављених оскултација на тијелу бране – тангенцијална, радијална и положајна помјерања, стандардна одступања помје

рања по осам, као и полуосе елипси повјерења, те закључак о томе да ли је тачка стабилна.

Табела 1. Деформације тачака на тијелу (лицу) бране

Тачка	dX [mm]	dY [mm]	dP [mm]	σX [mm]	σY [mm]	A [mm]	B [mm]	стабилна
2D4	-1.4	3.8	4	1.9	2.6	11.8	4.2	✓
2D5	-2.6	4	4.8	2.1	3.4	14.5	5.2	✓
2L4	-2.2	4.3	4.8	1.9	2.7	11.8	4.2	✗
2L5	-1.9	7	7.3	2.1	3.4	14.4	5	✗
3D4	-4.5	5	6.7	2.7	2.4	12.7	4.9	✗
3D5	0.8	3.8	3.9	3.3	2.5	14.9	5	✓
3L4	1.2	7.1	7.2	2.6	2.2	12.1	4.9	✗
3L5	2	7.4	7.7	2.8	2.2	12.5	5.1	✗
4D4	-4.5	5.4	7	2.9	2.1	12.5	5.4	✗
4D5	0.5	7.7	7.7	3.1	2	12.4	6.8	✗
4L4	-6.6	5.5	8.6	2.6	1.9	11.1	5.4	✗
4L5	-5.8	5	7.7	3	2.1	12.8	5.6	✗
5D4	-4	7.8	8.8	2.8	1.9	11.5	6.1	✗
5D5	-1.5	8	8.1	3	1.9	11.8	6.7	✗
5L4	-0.8	7.6	7.6	2.8	1.9	11.2	6.1	✗
5L5	-4.2	8.6	9.6	2.8	1.8	11.1	6.3	✗
6D4	-6.8	8.5	10.9	2.8	2	10.8	7.4	✗
6D5	4.9	10.1	11.2	3.3	2	12.7	7.5	✗
6L4	-5	7.5	9	2.7	1.9	10.3	6.9	✗
6L5	-5.4	8.8	10.3	2.8	1.9	10.6	7.1	✗
7D4	-1.7	8.2	8.4	2.5	2	9.7	7.7	✗
7D5	-4.5	8.5	9.6	3	2.2	11.8	8.2	✗
7L4	-1.1	9.5	9.6	2.6	2	9.9	7.6	✗
7L5	-5.3	12.4	13.5	2.7	2.2	10.7	8.1	✗

## 7. ЗАКЉУЧАК

Бране, као хидротехнички објекти од немјерљивог значаја за људско друштво, представљају велики изазов за грађевинске и геодетске инжењере, стога проблематици пројектовања, грађења и одржавања брана треба приступати с високим степеном стручности и озбиљности, како би се предуприједила појава ломова дијелова или читаве бране, те обезбиједила њена дуготрајна стабилност и могућност експлоатације.

На примјеру бране на Тиси уочен је недостатак квалитетно и свеобухватно архивираних података о опажањима и обради, као и методологији истих, о чему треба водити рачуна у даљем периоду експлоатације ове бране, те је стога као нова основа за поређење резултата узета епоха мјерења из 2017. год. Резултати оскултација обављених у августу 2019. године указују на релативно мала помјерања објекта у односу на поређену епоху, те да су добијена помјерања тачака сличног смјера као и ранијих година. Међутим због великог временског интервала, недостатка документације о извршеним опажањима и недефинисане методологије рада у претходним периодима ипак је неопходно ове резултате посматрати са одређеним степеном опреза.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петровић П. (2005): *Хидротехничке конструкције, трећи део – бране*. Београд: Грађевински факултет (Београд: GRAFO-COMM)
- [2] Савић Љ. (1960): *Увод у хидротехничке грађевине*. Београд: Грађевински факултет, 2009 – др. издање (Београд: Дедрепласт); 528 стр.
- [3] Стојић П. (1997): *Хидротехничке грађевине – Књига 1*. Сплит: Грађевински факултет у Сплиту (Manualia Universitatis studiorum Spalatensis); 481 стр.
- [4] Петровић П. (1997): *Хидротехничке конструкције - Део 1*, Београд: Грађевински факултет (Београд: GRAFO-COMM)
- [5] Институт за воде д.о.о. Бијељина (2018): *Докази у циљу обезбјеђења еколошке дозволе за систем за задржавање и акумулацију воде брана Врба и Клиње, за потребе ЗП „РiТЕ Гацко“ а.д. Гацко*
- [6] Перовић Г., Ђедовић Г., (2011): *Иновација пројекта техничког осматрања зидане лучне бране „Клиње“*. Београд: ГВ ГЕОВУЛКОМ; 35 стр.
- [7] Перовић Г., Ђедовић Г., (2011): *Иновација пројекта техничког осматрања насуте бране „Врба“*. Београд: ГВ ГЕОВУЛКОМ, 48 стр.
- [8] GEOSOFT DOO BEOGRAD (2016): *Елаборат геодетског осматрања бране на Тиси – осматрање јули 2016. године*

### Кратка биографија:



**Милош Савић** рођен је у Гацку 1994. год. Звање дипломираног инжењера стекао је 2017. год. на Факултету техничких наука у Новом Саду. Исте године уписује мастер академске студије на истом студијском програму. Област интересовања: инжењерска геодезија.

контакт: [msavic059@gmail.com](mailto:msavic059@gmail.com)