

**Факултет инжењерских наука  
Универзитета у Крагујевцу**



**Назив студијског програма: Машинско инжењерство**

**Ниво студија: Мастер академске студије**

**Модул: Енергетика и процесна техника**

**Предмет: Обновљиви извори енергије 2**

**Број индекса: 335/2010**

**Тања А. Јаковљевић**  
**Грађевински елементи малих  
хидроелектрана**  
**мастер рад**

**Комисија за преглед и одбрану:**

1. **Др Душан Гордић - ментор**

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Датум одбране: \_\_\_\_\_

Оцена: \_\_\_\_\_

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Препоручена литература:

[1] Гордић Душан: „Обновљиви извори енергије 2 - мале хидроелектране”, скрипта, Машински факултет Крагујевац, Крагујевац 2012.

[2] Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant, ESHA 2004.

[3] Петар Стојић: „Хидротехничке грађевине”- књига 1., Грађевински факултет, Сплит 1997.

Крагујевац, \_\_\_\_\_

ментор:

**Др Душан Гордић**

\_\_\_\_\_

## Резиме

Као и пре више од једног века, када је производњом и употребом електричне енергије започело ново поглавље у историји савременог света, тако је и данас производња електричне енергије из малих хидроелектрана, део новог поглавља напретка у коме је човек окренут очувању природе и заштити животне средине. Ова чињеница представља изазов за новим сазнањима, а самим тим и инспирацију за истраживање у областима које овај рад обухвата, а који пре свега стављају акценат на искоришћење хидропотенцијала, кроз велики избор у техникама грађења и начину коришћења грађевинских елемената.

Овај рад се састоји из седам поглавља, од којих прво представља увод који описује основне дефиниције, историјски развој малих хидроелектрана, као и њихово учешће у обновљивим изворима енергије. Друго поглавље се односи на основне појмове хидраулике воденог тока, са основним једначинама струјања флуида у цевима и отвореним каналима. У трећем поглављу налазе се основни грађевински елементи малих хидроелектрана са детаљним описом за сваки елемент појединачно, њиховим карактеристикама и применом. Пример искоришћења енергетског потенцијала са одабраним грађевинским елементима је описан у четвртом поглављу, кроз прорачун који се односи на губитке енергије једне мале хидроелектране при савладавању теренских прилика, а према одабраним грађевинским елементима, којима се вода доводи од акумулације до машинске зграде. Утицај који настаје изградњом и коришћењем објеката малих хидроелектрана на животну средину описан је у петом поглављу, где су дате и препоруке за обнову терена. Шесто поглавље садржи закључна разматрања. У седмом поглављу се налази литература која је коришћена у писању рада.

**Кључне речи:** брана, захват, водостан, испуст и прелив, канал, тунел, цевовод под притиском и машинска зграда.

## Abstract

Like more than a century ago, when the production and use of electricity started new chapter in the history of the modern world, nowadays the production of electricity from small hydropower plants is part of a new chapter of progress, in which the man is focused to the nature conservation and environmental protection. This fact poses a challenge for new knowledge, and thus the inspiration for research in areas that include the work, which primarily emphasize the use of hydropower through a wide range of building techniques and how to use the building elements.

This paper consists of seven chapters, the first of which is an introduction that describes the basic definitions, historical development of small hydro power plants, as well as their participation in renewable energy. The second chapter addresses the basic concepts of hydraulics of water flow, the basic equations of fluid flow in pipes and open channels. The third chapter provides the basic building elements of small hydro power plants with a detailed description of each element individually, their characteristics and applications. An example of utilization of the energy potential of selected building elements is described in the fourth section, the calculation of which is related to the loss of power in hydroelectric power plant, restraining the field conditions and the selected construction elements, which brings water from the reservoir to the powerhouse. Impact resulting from the construction and exploitation of small hydro power plants, on the environment is described in chapter five, which contains recommendations for the reconstruction of the field. The sixth chapter contains concluding remarks. Seventh chapter contains the literature that was used in writing the paper.

**Keywords:** dam (weir), intake, forebay, spillway, canal, tunnel, penstock and power house.

## Садржај:

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Уводне напомене .....</b>                                   | <b>5</b>  |
| 1.1. Историјски развој .....                                      | 5         |
| 1.2. Мале хидроелектране као обновљиви извори енергије.....       | 6         |
| 1.3. Облици малих хидроелектрана .....                            | 7         |
| <b>2. Основе хидраулике .....</b>                                 | <b>13</b> |
| 2.1. Основни појмови хидраулике воденог тока .....                | 13        |
| 2.2. Проток воде у цевима .....                                   | 14        |
| 2.2.1. Губици услед трења.....                                    | 16        |
| 2.2.2. Локални губици притиска .....                              | 21        |
| 2.2.2.1. Губици на решетки .....                                  | 21        |
| 2.2.2.2. Губици услед наглог проширења или наглог сужења .....    | 22        |
| 2.2.2.3. Губитак у кривинама и коленима .....                     | 24        |
| 2.2.2.4. Губитак у вентилима .....                                | 25        |
| 2.3. Појава хидрауличног удара .....                              | 25        |
| 2.3.1. Развој хидрауличног удара.....                             | 26        |
| 2.3.2. Заштита цевовода од хидрауличног удара .....               | 28        |
| 2.4. Проток воде у отвореним каналима .....                       | 29        |
| 2.4.1. Класификација токова отворених канала .....                | 30        |
| 2.4.2. Униформно струјање у отвореним каналима .....              | 31        |
| 2.4.3. Ефикасан попречни пресек у отвореним каналима .....        | 32        |
| 2.4.4. Енергетска једначина отвореног тока.....                   | 32        |
| <b>3. Основни грађевински елементи малих хидроелектрана .....</b> | <b>36</b> |
| 3.1. Брана или водојажа.....                                      | 37        |
| 3.1.1. Делови бране .....                                         | 38        |
| 3.1.2. Подела брана .....                                         | 39        |
| 3.1.2.1. Сталне бране .....                                       | 40        |
| 3.1.2.1.1. Сигурност брана .....                                  | 45        |
| 3.1.2.2. Покретне бране и уставе.....                             | 46        |
| 3.2. Додатни подизачи нивоа воде.....                             | 49        |
| 3.3. Испуст (прелив) .....                                        | 51        |
| 3.4. Захват .....                                                 | 54        |

|                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4.1. Типови захвата.....                                                        | 55         |
| 3.5. Решетка за отпад.....                                                        | 58         |
| 3.6. Доводни органи.....                                                          | 61         |
| 3.6.1. Канали са слободном површином воде .....                                   | 61         |
| 3.6.2. Тунели и цевоводи (цеви) под притиском.....                                | 65         |
| 3.6.2.1. Начин и избор материјала за цевовод под притиском .....                  | 66         |
| 3.6.2.2. Хидрауличне карактеристике и структурни захтеви .....                    | 70         |
| 3.6.2.3. Носачи, клизни подупирач и компензатори.....                             | 72         |
| 3.6.3. Водостан .....                                                             | 73         |
| 3.7. Затварачи и вентили .....                                                    | 74         |
| 3.8. Разводник воде.....                                                          | 76         |
| 3.9. Одводни канал устава за оправке.....                                         | 77         |
| 3.10. Машинска зграда .....                                                       | 78         |
| <b>4. Пример прорачуна .....</b>                                                  | <b>81</b>  |
| 4.1. Прорачун губитака.....                                                       | 81         |
| 4.1.1. Прорачун успутних губитака.....                                            | 83         |
| 4.1.2. Прорачун локалних губитака.....                                            | 84         |
| <b>5. Утицај изградње и коришћења мале хидроелектране на животну средину ....</b> | <b>88</b>  |
| 5.1. Утицаји током изградње.....                                                  | 90         |
| 5.1.1. Резервоари .....                                                           | 90         |
| 5.1.2. Водозахвати, отворени канали, цевоводи, одводни канали.....                | 90         |
| 5.2. Утицаји који настају током фазе функционисања постројења .....               | 91         |
| 5.2.1. Звучни ефекти.....                                                         | 91         |
| 5.2.2. Утицај на пејзаж .....                                                     | 92         |
| 5.2.3. Биолошки утицај .....                                                      | 95         |
| 5.2.3.1. Узводни пролази за рибе.....                                             | 96         |
| 5.2.3.2. Пролази за рибе (доњи ток).....                                          | 100        |
| 5.2.3.3. Систем управљања понашањем .....                                         | 101        |
| 5.2.4. Утицаји на копно .....                                                     | 101        |
| 5.2.5. Отпадни материјал .....                                                    | 102        |
| <b>6. Закључак .....</b>                                                          | <b>103</b> |
| <b>7. Литература:.....</b>                                                        | <b>104</b> |

## 1. Уводне напомене

### 1.1. Историјски развој

Енергију речних токова „водну снагу”, људи су запазили још у најстарија времена посматрајући водопаде и бујице. Људски ум је занимала мисао, како би се могла искористити снага воде, како спречити пустошења, укротити реке и натерати их да натапају поља и замењују људски рад [2]. Најпре су, у земљама Мале Азије, почела да се граде примарна водна кола - долапи, покретани водом - које и данас срећемо у нашим јужним крајевима. Дрвени точкови велики неколико метара и једним крајем потопљени у воду, ослањали су се својим вратилом на јаку дрвену конструкцију. Речна струја захватала је даске причвршћене за обод точка, повлачила их са собом и тако окретала точак. Ведрице заковане за точак, пуниле су се водом при обртању точкова, издизале се и у подметнути олук изливале воду, која је затим дрвеним каналима отицала у поља. Нешто касније су почеле да се граде воденице, које су на сличан начин користиле енергију воде.



Слика 1.1. Прве хидроелектране [5]

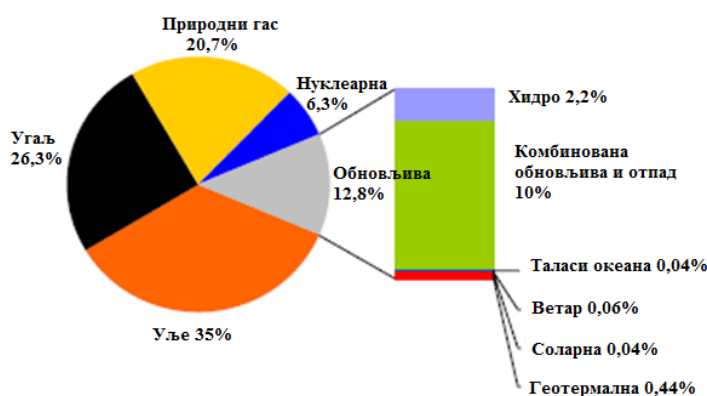
Тек средином 19. века, дошло се на идеју да се потенцијална енергија воде најпре претвори, делимично у кинетичку, а делимично у енергију притиска, па у механички рад, што је био корак ка изградњи првих хидроелектрана које су конструкцијски приказане као на слици 1.1. Тако су се из примитивних водних кола, која су нерационално користила енергију воде, развиле водене турбине које до максимума искоришћавају расположиви енергију.

Огроман напредак у искоришћењу енергије воде, на планинским потоцима и равничарским рекама, условљавао је напредак у техници грађења великих брана и водојажа, које преграђују речне долине. Оваквим начином преграђивања речних долина стварају се акумулације које могу да приме и задрже од неколико десетина, па до неколико стотина милиона  $m^3$  воде, чиме се може ублажити катастрофални надолазак воде приликом поплава, као и проблеми наводњавања поља у подручјима

близу реке [2]. Захваљујући општем напретку технике, данас смо у могућности да искористимо снагу сваке реке. Мале хидроелектране пружају одређене предности у том смислу, јер је инсталација релативно мала и може да буде и енергетски и еколошки прихватљива [4].

## 1.2. Мале хидроелектране као обновљиви извори енергије

Обновљиви извори енергије учествују са 12,8% у глобалном билансу примарне енергије. Хидроенергија је друга по величини од обновљивих извора енергија, (са уделом од 2,2%), јер биомаса заузима значајно место у обновљивим изворима енергије са уделом од 10%.



Слика 1.2. Приказ удела обновљивих извора енергије у свету

Мале хидроелектране чине мали део укупног светског хидроенергетског капацитета, али је са 4,1% колико је износио 1980. године, порастао на 7,7% у 2005. години. Глобални капацитет малих хидроелектрана процењен је на 58,5 GW, а претпоставља се да ће се повећати на 95 GW у 2015. години. У Европи је инсталирано преко 13 GW капацитета малих хидроелектрана, а од тога у ЕУ преко 11,5 GW.

Уопштено не постоји интернационално прихваћена дефиниција малих хидроелектрана. У суштини, хидроелектране су постројења у којима се потенцијална и кинетичка енергија воде преко турбине, генератора и осталих делова претвара у електричну енергију. У категоризацији малих хидроелектрана, израз „мини” обично се односи на системе капацитета испод 1 MW, „микро” испод 100 kW и „пико” испод 5 kW. У различитим државама, горња граница инсталисане снаге за мале хидроелектране варира између 1,5 и 50 MW. Неке земље попут Португалије, Шпаније, Ирске, Грчке и Белгије су прихватиле 10 MW као горњу границу инсталисане снаге за мале хидроелектране. У Италији је граница 3 MW, у Шведској 1,5 MW, у Француској 8 MW, у Кини 25 MW, у Индији 15 MW. У Србији према законској регулативи граница је 10 MW, међутим и у Европи се све више прихвата граница од 10 MW [1].

### 1.3. Облици малих хидроелектрана

Хидропостројења се подижу са задатком да, с једне стране до највеће могуће мере искористе расположиву снагу воде, а с друге стране да дају најповољније решење по питању снабдевања енергијом различитих потрошача, који ће бити везани за хидропостројење. Решавање овог проблема отежано је тиме што се количина енергије која се од постројења захтева и које постројење може да генерише, не поклапају ни временски ни по количини [2]. Данас се мале хидроелектране све више користе широм света за добијање електричне енергије. Оне се морају пројектовати тако да искористе хидропотенцијал малих водотокова на оптималан начин, техникама које пружају максималну заштиту животне средине. Постоји више начина извођења малих хидроелектрана, на основу којих се може извршити и њихова подела.

Према величини напора, разликују се три категорије идејних решења малих хидроелектрана:

- високи напор (100 m и изнад),
- средњи напор (30-100 m) и
- ниски напор (2-30 m).

У зависности од извођења, а такође и напора, мале хидроелектране се могу поделити према врсти искоришћења воде на:

- постројења са директним коришћењем протока (проточна постројења),
- мале хидроелектране са резервоаром.

Проточна мала хидроелектрана се израђује без складиштења воде (без резервоара). Оваквим начином извођења хидроелектрана има малу висинску разлику испред и иза места захватања воде, тако да користи кинетичку енергију коју поседује водени ток. Снага овакве електране, зависи искључиво од тренутне количине воде која се налази у природном току. Овакви типови хидроелектрана не дају довољно снаге, па се сходно томе користе за снабдевање изолованих подручја или индустрије, уколико је њихов минимални проток довољан да задовољи максималне прописане снаге. У неким случајевима при изradi мале проточне хидроелектране врши се скретање тока реке, услед чега се користи висински пад који настаје због удаљености реке. Преусмеравање тока се врши малом браном или уставом, како би се ток усмерио према захвату, што за последицу има смањени проток у реци између улаза и машинске зграде.

За разлику од проточне, мала хидроелектрана са резервоаром, приказана на слици 1.3., јесте акумулациона хидроелектрана која се прави преграђивањем реке и заустављањем тока (бране), што ствара акумулационо језеро узводно од бране које садржи велике количине воде и представља резервоар енергије, а може се користити и у друге сврхе (наводњавање, риболов и сл.). Код ових електрана обично, постоје велике годишње варијације у количини воде. Вода се од бране доводи тунелима, који могу бити дугачки километрима, до машинске зграде (турбине). Изградња акумулације за мале

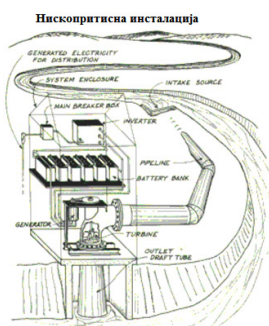
хидроелектране обично није финансијски исплатива, осим на изолованим и удаљеним местима, где вредност енергије има високу цену. Често оваква решења која захтевају скретање и преграђивање водених токова могу се негативно одразити на животну средину, па би добро решење представљало неко природно језеро чију би енергију могли да искористимо за производњу електричне енергије, тако да се не наруши природни екосистем тог подручја.



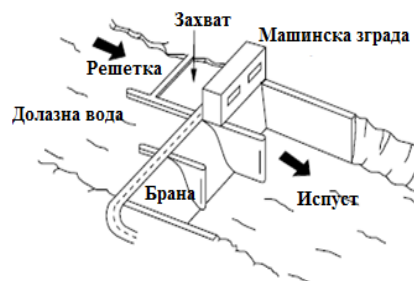
Слика 1.3. Акумулациона хидроелектрана

Други тип мале хидроелектране са резервоаром представља реверзибилна хидроелектрана. Она је конструкцијски слична акумулационој, али има велике пумпе које у време мање потрошње струје враћају воду у акумулационо језеро, док у периоду несташице енергије користе воду из акумулације за производњу струје кад је потребнија и скупља. Енергија потребна за пумпање воде мора бити генерисана од стране неког другог извора. Овакве хидроелектране служе за уравнотежење производње и потрошње у електричној мрежи.

Деривацијске хидроелектране су врста хидроелектрана код којих се машинска зграда за производњу енергије налази измештена на некој удаљености (низводно од захвата), а вода се доводи посебним цевима од захвата до машинске зграде. На слици 1.4., приказан је тип једне деривацијске хидроелектране, док је на слици 1.5., приказан тип хидроелектране са машинском зградом на самој брани.



Слика 1.4. Тип деривацијске хидроелектране



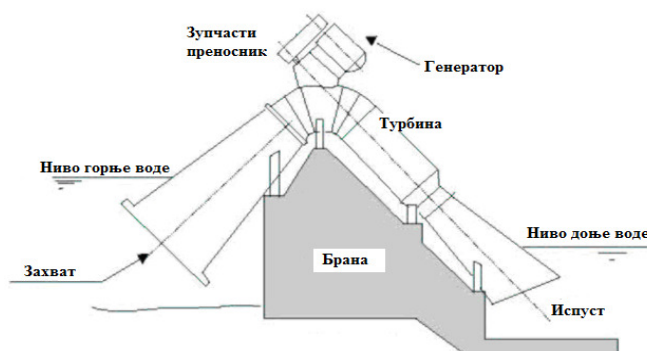
Слика 1.5. Тип хидроелектране са машинском зградом у самој брани

Нископритисне мале хидроелектране са машинском зградом на дну бране не могу приуштити изградњу великих резервоара или акумулација да би се користиле залихама воде када је то најпогодније, јер би изградња релативно велике бране била скупа и економски неисплатива. Али ако је акумулација већ изграђена за друге сврхе, као што су заштита од поплаве, наводњавање, прикупљање воде за велике градове, рекреацијска подручја и слично, могуће је производити електричну енергију користећи постојећи одвод или природни ток резервоара (акумулације). На слици 1.6., је приказана једна мала хидроелектрана са постројењем на дну бране.



Слика 1.6. Нископритисне мале хидроелектране са постројењем на дну бране

У случају да брана није превисока може се уградити сифонски довод, као што је приказано на слици 1.7. Интегрални сифонски довод омогућује елегантно извођење постројења, висине од 10 m и за постројења до 1000 kW, иако постоје постројења са сифонским доводом са инсталираном снагом до 11 MW (Шведска) и висине до 30,5 m (САД).

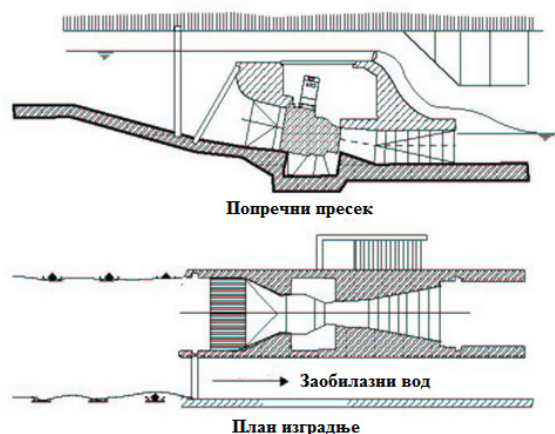


Слика 1.7. Тип хидроелектране са сифонским доводом

Мале хидроелектране могу бити интегрисане у канале за наводњавање, па постоје два типа малих хидроелектрана које користе канал за наводњавање:

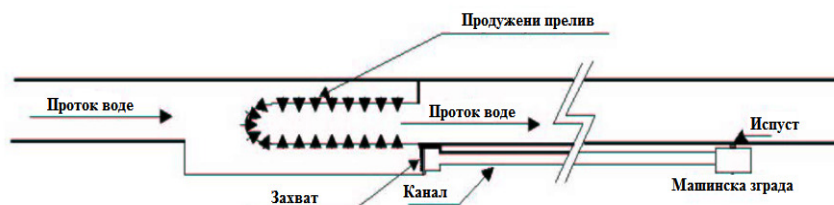
- Када је канал довољно велики за смештај захвата, машинске зграде, одвода и бочног обилазног вода. Да би осигурали снабдевање водом за наводњавање, решење мора да садржи бочни обилазни вод у случају искључења турбине. Овакв тип мале хидроелектране захтева пројектовање истовремено када и пројектовање канала за наводњавање, јер би уграђивање у канал који је већ у

функцији могло да буде врло скупо решење. На слици 1.8., приказано је једно такво решење.



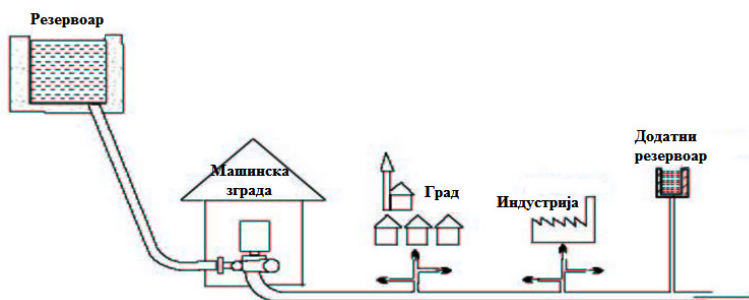
Слика 1.8. Пројектовање канала и система

- Ако канал већ постоји, као на слици 1.9., требало би га незнатно повећати за смештај захвата и прелива. Да би се ширина захвата свела на минимум, потребно је уградити издужени прелив. Од захвата се вода кроз потисни цевовод доводи до турбине, а затим се кроз кратки испуст враћа у канал.



Слика 1.9. Уградња система у постојећи канал

Мале хидроелектране уграђене у систем за водоснабдевање, код којих се вода за пиће испоручује у град транспортом из повишеног резервоара кроз цевовод под притиском је приказан на слици 1.10. Уобичајено, код таквих постројења, дисипација енергије на нижем крају цевовода, на уласку у постројење за пречишћавање воде, се ублажава коришћењем специјалних вентила. Смештањем турбине на крај цевовода, да претвори ионако изгуљену енергију у електричну, zgodна је опција, под условом да се избегне хидраулични удар. Да би се осигурало трајно снабдевање водом мора бити уграђен систем обилазних вентила. У неким системима водоснабдевања, турбина има испуст у отворени базен или језеро. Систем за контролу одржава ниво воде у базену. У случају механичког застоја или застоја турбине, систем обилазних вентила такође може одржавати ниво воде у базену. У случају да главни обилазни вентил испадне из погона појављује се надпритисак, те се помоћни обилазни вентил брзо отвора. Контролни системи су још сложенији код система где је излаз из турбине подвргнут противпритиску водоводне мреже [1].



Слика 1.10. Мала хидроелектрана уграђена у систем за водоснабдевање.

Из претходно наведених примера може се видети да највећу различитост у грађењу изазивају теренске прилике. Терен на коме се постројење подиже утиче у толикој мери да не постоје два истоветна постројења, већ свако представља посебно, мање или више квалитетно решење. Идеално је решење када се машинска зграда налази непосредно поред бране - када се пад користи на оном месту на коме је и настао. Тиме су избегнути дугачки канали, тунели или цевоводи, па постројење, поред тога што је јефтиније, боље искоришћава расположиву енергију, јер не постоје губици услед отпора у доводним органима. Ипак подизање тако високих брана није увек могуће, због тога што то околни терен не допушта, јер брана може бити висока колико и обале на речној деоници од границе успора до бране. Да би подизање скупог хидропостројења било са економског гледишта прихватљиво, добијена снага треба да одговара инвестиционим трошковима, а то значи да при малим падовима, које оваква постројења користе, проток мора бити прилично велики [2].

Да би смо на прави начин препознали и прихватили мале хидроелектране као добро решење, неопходно је да се у први план истакну све предности и недостаци њиховог функционисања уопште. Предности коришћења малих хидроелектрана се огледају у следећем:

- ради се о чистом и обновљивом извору енергије, јер за погон користе воду, која се у процесу производње електричне енергије не троши,
- у односу на велике хидроелектране нема плављења широких подручја (како би се обезбедио простор за акумулацију воде) и нарушавања локалног еколошког система,
- могу обезбедити наводњавање земљишта, као и снабдевање водом околних насеља, изградњу рибњака и заштиту од поплава,
- смањују инвестициона улагања за електрификацију удаљених насеља од опште електричне мреже, чиме се доприноси унапређењу њиховог развоја;
- пошто су најчешће лоциране близу корисника, губици електричне енергије у преносу се смањују и растеређује се електро мрежа;
- отварају се нова радна места за надгледање функционисања електране,
- експлоатишу се уз релативно ниске трошкове,
- радни век је врло дуг, у просеку 30 година, а има оних које раде и 80 и више година.

Недостаци коришћења малих хидроелектрана се односе на:

- потребно обезбеђивање биолошког минимума (резервног тока),
- потребна уградња пролаза за рибе (повреде и миграција риба, утицај на непосредни еко - систем)
- бука, вибрације, визуелно нарушавање околине,
- основни проблем при раду у електроенергетском систему су несталан проток (варијације тока и мала акумулација),
- компликована изградња и релативно високи инвестициони трошкови [1].

## 2. Основе хидраулике

Хидроградња је заснована на принципима механике флуида, иако се многи емиријски односи примењују за постизање практичних инжењерских решења. До сада не постоји, а вероватно никада и неће, општа методологија за математичку анализу кретања течности. На основу искуства акумулираног током година студија и праксе, постоје одређена решења за специфичне проблеме.

У хидроелектранама хидроградња се примењује да би:

- оптимизовали карактеристике водених токова и смањили енергетске губитке,
- конструисали преливе и структуре за превенцију од поплава,
- конструисали адекватне енергетске структуре низводно од прелива,
- контролисали ерозију и транспорт наноса [7].

### 2.1. Основни појмови хидраулике воденог тока

Да би се успешно реализовао пројекат коришћења малог водног тока, потребно је детаљно разумети основне физичке принципе којима се описује кретање нестишљивог флуида у цевима и отвореним токовима. Количина течности која у јединици времена протекне кроз уочени проточни пресек, представља проток флуида кроз тај пресек. У зависности од физичке величине којом се описује поменута количина флуида, разликујемо масени  $Q_m$  [kg/s] и запремински проток  $Q$  [m<sup>3</sup>/s]. Веза између ове две физичке величине је:

$$Q_m = \rho \cdot Q \quad (2.1)$$

Пошто је у хидраулици радни флуид нестишљив ( $\rho=const$ ), честу примену има запремински протока.

Брзина струјања течности се мења од влакна до влакна у истој струјној цеви. Средња брзина  $v$  [m/s], је брзина којом би требало да се креће сваки делић флуида у посматраном проточном пресеку површине  $A$  [m<sup>2</sup>], да би се остварио исти проток  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] као и са стварном брзином, која се мења од тачке до тачке поменутог проточног пресека [1]:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2.2)$$

## 2.2. Проток воде у цевима

Одређена количина воде ће имати потенцијалну енергију на основу пада, (струјање водених токова се обавља под утицајем гравитације, односно висинске разлике нивоа). Ова енергија је гравитационо потенцијална енергија која је производ масе, убрзања силе земљине теже и пада и уопштено се изражава у Џулима [J].

Енергија јединице масе флуида изражена у дужинским мерама, приликом протицања воде кроз затворену цев кружног попречног пресека, под одређеним притиском је дата Бернулијевом (*Bernoulli*) једначином (2.3). Ова енергија представља алгебарски збир потенцијалне енергије  $h_1$ , притисне енергије  $p_1/\rho g$ , и кинетичке енергије  $\alpha v_1^2/2g$ . За отворени канал важи иста једначина, али је термин  $p_1/\rho g$ , замењен са  $d_1$  дужином воде [7].

$$H_1 = h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha \frac{v_1^2}{2g} \quad (2.3)$$

где су:

$H_1$  [m] - енергија јединице масе флуида у дужинским мерама,

$h_1$  [m] - надморска висина изнад неке одређене равни,

$p_1$  [Pa] - притисак,

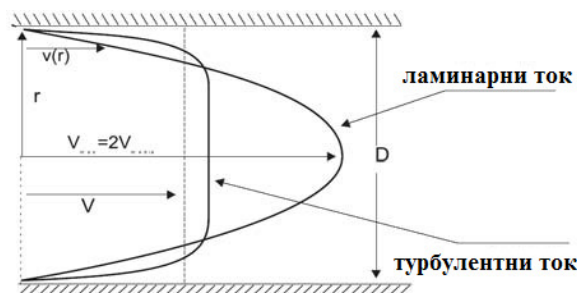
$\alpha$  [m/s] - Кориолисов (*Coriolis*) број (који се најчешће занемарује код турбулентног режима струјања),

$v_1$  [m/s] - брзина воде,

$g$  [m/s<sup>2</sup>] - убрзање силе земљине теже,

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] - густина воде.

Посматрањем кретања флуида могу се у основи запазити два режима струјања, и то ламинарно и турбулентно. Ламинарно (слојевито) струјање је такво струјање код кога се струјнице не укрштају; одређене су обликом простора кроз који протичу и еквидистантне су. Код овог режима струјања нема попречног струјања течности и оно одаје утисак потпуне правилности. За разлику од ламинарног, турбулентно струјање је такво струјање код кога се струјнице укрштају. Осим уздужног кретања флуида, постоји и кретање попречно на правац главног тока, уз интензивно мешање делића флуида (делићи флуида из једног, прелазе у суседне слојеве) [1].



Слика 2.1. Расподела брзина за ламинарно и турбулентно струјање.

Рејнолдс (*Reynolds*) је крајем 19. века, утврдио да прелаз из ламинарног у турбулентни ток зависи, не само од брзине, већ и од пречника цеви и вискозности течности, а однос је инерцијалних и вискозних сила. Овај однос је познат као Рејнолдсов број и може бити изражен у случају кружне цеви, једначином:

$$R_e = \frac{d \cdot v}{\nu} \quad (2.4)$$

где је:

- $d$  [m] - пречник цеви,
- $v$  [m/s] - просечна брзина воде,
- $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] - кинематска вискозност течности.

Из експеримената је утврђено да је за протоке у кружним цевима критична вредност Рејнолдсовог броја 2320. У ствари, овај прелаз не мора увек да се дешава када је вредност  $R_e = 2320$ , али варира у зависности од услова. Како ова вредност варира у зависности од услова, овде можемо говорити о прелазном опсегу.

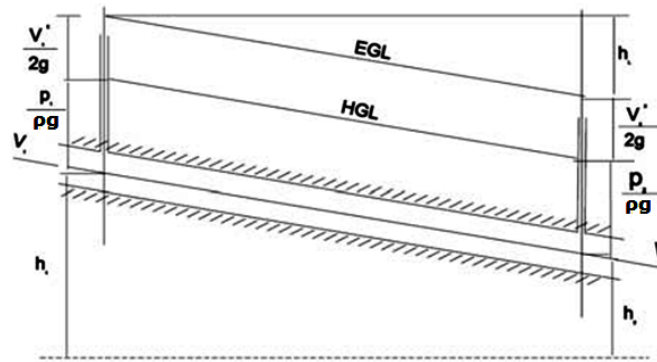
Вода губи енергију при протицању кроз цевовод, због:

1. трења о зид цеви;
2. расипања енергије као последице унутрашњег трења тока.

Трење о зид цеви зависи од материјала зида цеви и градијента брзине у близини зида. Градијент брзине је виши у турбулентном току него у ламинарном режиму струјања, (слика 2.1.). Дакле, када се Рејнолдсов број повећа, губитак услед трења ће се повећати. У исто време, код виших турбуленција постоји интензивније мешање честица, а самим тим и веће расипања енергије као последице унутрашњег трења. Због тога ће се губици енергије при струјању у цевима повећати са Рејнолдсовим бројем, као и са повећањем храпавости цеви. Може се утврдити количина енергије  $h_f$  која је изгубљена, за воду која тече између две деонице:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + h_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + h_2 + h_f \quad (2.5)$$

На слици 2.2. приказане су HGL линија (хидраулични градијент) и EGL линија (енергетски градијент) у зависности од трења воде о зид цеви и услед унутрашњег трења. Ако је попречни пресек цеви константан,  $v_1 = v_2$  и обе линије ће бити паралелне [7].



Слика 2.2. Хидраулични и енергетски градијент.

### 2.2.1. Губици услед трења

Дарси (*Darcy*) и Вајсбах (*Weisbach*) су применом принципа одржања масе одређене запремине течности у цеви, између два пресека, извели следећу једначину која важи за нестишљив флуид и константан проток, кроз цев:

$$h_f = \lambda \cdot \left(\frac{L}{d}\right) \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.6)$$

где је:

$\lambda$  [-] - коефицијент отпора,

$L$  [m] - дужина цеви.

За ламинарно струјање  $\lambda$  се може директно израчунати по формули:

$$\lambda = \frac{64 \cdot \nu}{v \cdot d} = \frac{64}{Re} \quad (2.7)$$

Према једначини (2.7) коефицијент отпора  $\lambda$  за ламинарно струјање је независан од храпавости зида и обрнуто сразмеран Рејнолдсовом броју. Чињеница да се  $\lambda$  смањује са повећањем  $Re$ , не значи да повећање брзине смањује губитке услед трења [7]. Заменом  $\lambda$  у израз (2.6) добија се:

$$h_f = \frac{64 \cdot \nu}{v \cdot d} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = \frac{32 \cdot \nu \cdot L \cdot v}{g \cdot d^2} \quad (2.8)$$

Када је струјање турбулентно ( $Re > 2000$ ), коефицијент отпора трења постаје мање зависан од Рејнолдсовог броја, а више од релативне храпавости  $e/d$ , где  $e$  представља просечну вредност релативне храпавости зида цеви пречника  $d$ . Неке вредности релативне храпавости  $e$  дате су у табели 2.1.

**Табела 2.1.** Вредност релативне храпавости за поједине материјале цеви.

| Материјал цеви                                 | $e$ (mm) |
|------------------------------------------------|----------|
| Полиетилен                                     | 0,003    |
| Фиберглас премазан епокси смолом               | 0,003    |
| Бешавне челичне комерцијалне(ново)             | 0,025    |
| Бешавне челичне комерцијалне(светло риђа)      | 0,250    |
| Бешавне челичне комерцијалне(поцинкована)      | 0,150    |
| Шавне челичне                                  | 0,600    |
| Ливено гвожђе (емајл)                          | 0,120    |
| Азбест цемент                                  | 0,025    |
| Дрво ламела                                    | 0,600    |
| Бетонски (челичне форме, са глатким спојевима) | 0,180    |

Познато је да чак и у турбулентним режимима струјања, одмах поред зида цеви, постоји веома танак гранични слој. Када се  $Re$  повећа, дебљина граничног слоја се смањује. Увек када је храпавост  $e$  мања од дебљине граничног слоја, цев се сматра хидраулички глатком.

При струјању у хидраулички глатким цевима, на коефицијент отпора трења  $\lambda$  не утиче храпавост цеви и за овај случај Фон Карман (*Von Karman*), развио је следеће изразе за коефицијент отпора  $\lambda$  [1]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log_{10} \left( \frac{Re \sqrt{\lambda}}{2,51} \right) \quad (2.9)$$

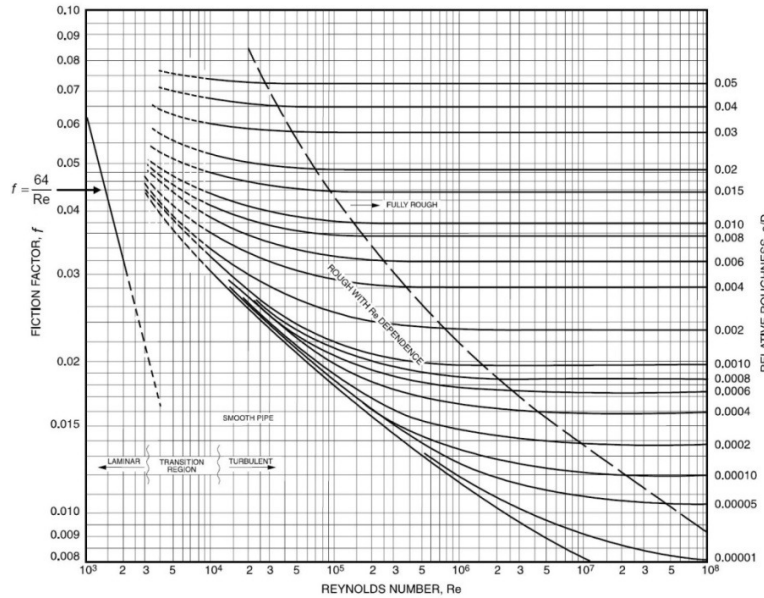
На великим вредностима  $Re$  броја, гранични слој постаје веома танак и коефицијент отпора  $\lambda$  је независан од  $Re$  броја, а зависи од релативне храпавости. У овом случају цев се сматра хидраулички храпавом, и Фон Карман је утврдио да је коефицијент отпора  $\lambda$ :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log_{10} \left( 3,7 \frac{d}{e} \right) \quad (2.10)$$

У подручју између ова два екстремна случаја, цев се не понаша ни као потпуно глатка, нити као потпуно храпава, и за ову ситуацију су Колбрук (*Colebrook*) и Вајт (*White*), дали следећу једначину:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log_{10} \left( \frac{e/d}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (2.11)$$

Једначине (2.9) и (2.11) тешко је решити ручно, што је навело Мудија (*Moody*) да припреми дијаграм: „Коефицијента отпора трења за струјање у цевима“ (слика 2.3).



Слика 2.3. Мудијев дијаграм

На дијаграму се могу уочити четири различите зоне струјања:

1. Зона ламинарног струјања (осенчена област на слици) где је  $\lambda$  линеарна функција од  $Re$  (једначина 2.7).
2. Критична зона (прелазни режим).
3. Прелазна зона, почиње од режима струјања у глатким цевима (једначина 2.9) и завршава испрекиданом линијом, где  $\lambda$  зависи од  $Re$  и  $e/d$  (једначина 2.11).
4. Турбулентна зона, где  $\lambda$  зависи искључиво од  $e/d$  (једначина 2.10).

Уколико је потребно одређивање максималне брзине воде која тече у цев пречника  $d$  и дужине  $L$ , без одређивања губитака услед трења  $h_f$ , треба користити независно променљиву  $f$ :

$$f = \frac{1}{2} \lambda R_e^2 \quad (2.12)$$

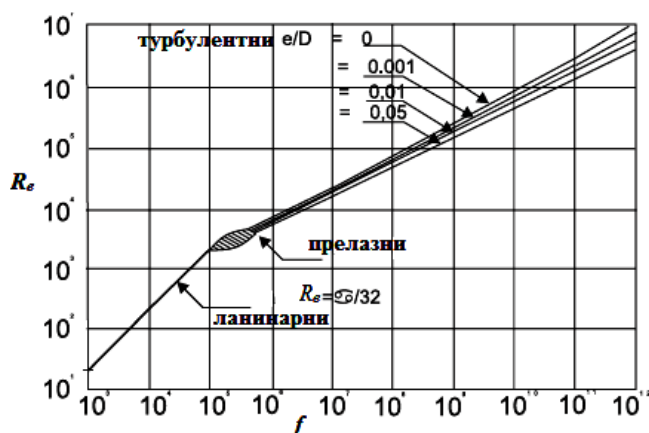
Заменом израза (2.4) за  $R_e$  и израза (2.6) за  $\lambda$  у претходни израз, добијамо:

$$f = \frac{gd^3 h_f}{Lv^2} \quad (2.13)$$

где су сви параметри познати. Када је  $f$  израчунато,  $\lambda$  је изведено из израза (2.12) и замењено у (2.11) добија се:

$$R_e = -2\sqrt{2f} \log_{10} \left( \frac{e/d}{3,7} + \frac{2,51}{\sqrt{2f}} \right) \quad (2.14)$$

Једначина која омогућава исцртавање  $R_e$  у вези са  $f$  на различитим вредностима  $e/d$  је приказана на слици 2.4, која представља варијацију Мудијевог дијаграма, где се  $R_e$  директно процењује [7].



Слика 2.4.  $f$  као функција Рејнолдсовог броја.

Током година многе емпиријске формуле су развијене, на основу акумулираног искуства. Оне генерално нису засноване на принципима физике, па чак повремено и немају повезаност, али су интуитивно засноване на уверењу да је трење у затвореној пуној цеви:

1. независно од притиска воде,
2. линеарно пропорционално дужини цеви,
3. обрнуто пропорционално одређеној снази пречника цеви,
4. пропорционално одређеном експоненту брзине воде.

Једна од тих формула, коју је развио Манинг, се користи често за процену струјања у отвореним каналима, али је применљива и за цеви:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot \frac{A^{5/3} S^{1/2}}{P^{2/3}} \quad (2.15)$$

где је:

- $n$  [ $s/m^{1/3}$ ] - Манингов коефицијент храпавости, (табела 2.2);
- $P$  [m] - оквашени обим,
- $A$  [ $m^2$ ] - површина попречног пресека цеви,
- $S$  [-] - губитак енергије по дужном метру ( $h_f/L$ ).

Примена ове формуле на затворену цев кружног попречног пресека даје:

$$S = \frac{10,29 \cdot n^2 \cdot Q^2}{d^{5,333}} \quad (2.16)$$

**Табела 2.2.** Манингови коефицијенти за неколико комерцијалних цеви.

| Врста цеви                                         | n     |
|----------------------------------------------------|-------|
| Шавне челичне                                      | 0,012 |
| Полиетилен (PE)                                    | 0,009 |
| PVC                                                | 0,009 |
| Азбест цемент                                      | 0,011 |
| Ковано гвожђе                                      | 0,015 |
| Ливено гвожђе                                      | 0,014 |
| Дрво - ламела (ново)                               | 0,012 |
| Бетон (челични облици са глатком завршном обрадом) | 0,014 |

Решења које пружа Манингова формули се не разликују много од оних које се добијају применом Колбрук - Вајтове једначине, осим при мањим пречницима, где је губитак енергије по Манингу већи од добијеног Колбруковом једначином.

У Северној Америци за цеви пречника већег од 5 cm и брзине струјања испод 3 m/s, се обично користи Хазен - Вилијамсова (*Hazen - Williams*) формула [7]:

$$h_f = \frac{6,87 \cdot L}{d^{1,165}} \left( \frac{v}{C} \right)^{1,85} \quad (2.17)$$

Где је, C - Хазен - Вилијамсов коефицијент у табели 2.3.

**Табела 2.3.** Хазен - Вилијамсов коефицијент.

| Тип цеви                         | C         |
|----------------------------------|-----------|
| Азбестно- цементна               | 140       |
| Ливено гвожђе                    |           |
| <b>Нова</b>                      | 130       |
| 10 година старе цеви             | 107-113   |
| 20 година старе цеви             | 89-90     |
| 30 година старе цеви             | 75-90     |
| <b>Бетон</b>                     |           |
| Израђене на месту уградње        | 120 - 140 |
| <b>Челик</b>                     |           |
| Цев израђена од катран и асфалта | 150       |
| Нове непремазане                 | 150       |
| Повезане заковицама              | 110       |
| Дрво- ламелна нова               | 120       |
| Пластичне цеви                   | 135-140   |

## 2.2.2. Локални губици притиска

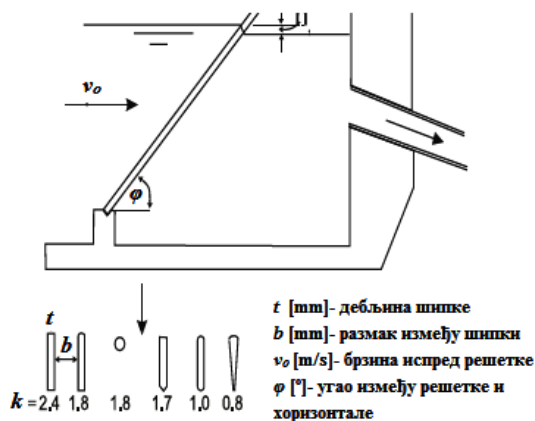
Осим губитака услед трења, при протицању воде кроз цевовод долази до појаве губитака притиска услед геометријских промена на улазу, кривинама, коленима, зглобовима, ивицама, вентилима, и наглим сужењима или проширењима цевовода. Овај губитак такође зависи и од брзине и изражава се експериментално коефицијентом  $K$  помноженим кинетичком енергијом  $v^2/2g$ .

### 2.2.2.1. Губици на решетки

Да би се спречило продирање чврстих предмета који пливају у води, у захвату се на улазу у доводни канал или цевовод поставља решетка. Иако је, по правилу, овај губитак релативно мали, његова вредност се може израчунати применом Кирхмерове (*Kirschmer*) формуле:

$$\Delta h_{vLR} = K_t \left( \frac{t}{b} \right)^{4/3} \left( \frac{v_o^2}{2g} \right) \sin \varphi \quad (2.18)$$

Где су параметри дати на слици 2.5.



Слика 2.5. Коефицијент губитака у решетки

Уколико решетка није постављена нормално, већ под углом  $\beta$  у односу правац струјања воде ( $\beta$  ће имати максималну вредност  $90^\circ$ , за решетку која је постављена у зиду канала), тада ће постојати додатни губици:

$$\Delta h_\beta = \frac{v_o^2}{2g} \sin \beta \quad (2.19)$$

На други начин се добијају када се резултат једначине (2.18) помножи фактором корелације  $k$  датом у табели 2.4. (према Мосонију (*Mosonyi*)) [7].

**Табела 2.4.** Додатни губици у решетки која је под углом у односу на ток.

| $t/d$<br>$\beta [^\circ]$ | 1,0  | 0,9  | 0,8  | 0,7  | 0,6  | 0,5  | 0,4  | 0,3  | 0,2  |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0                         | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 10                        | 1,06 | 1,07 | 1,08 | 1,09 | 1,10 | 1,11 | 1,12 | 1,14 | 1,15 |
| 20                        | 1,14 | 1,16 | 1,18 | 1,21 | 1,24 | 1,26 | 1,31 | 1,43 | 2,25 |
| 30                        | 1,25 | 1,28 | 1,31 | 1,35 | 1,44 | 1,50 | 1,64 | 1,90 | 3,60 |
| 40                        | 1,43 | 1,48 | 1,55 | 1,64 | 1,75 | 1,88 | 2,10 | 2,56 | 5,70 |
| 50                        | 1,75 | 1,85 | 1,96 | 2,10 | 2,30 | 2,60 | 3,00 | 3,80 | ...  |
| 60                        | 2,25 | 2,41 | 2,62 | 2,90 | 3,26 | 3,74 | 4,40 | 6,05 | ...  |

### 2.2.2.2. Губици услед наглог проширења или наглог сужења

Када цев има нагло сужење, постоји губитак енергије због повећања брзине протока воде и турбуленција великих размера које настају као последица промене геометрије. Ова појава је комплексна и бар за сада, тешко је обезбедити математичку анализу. Губитак се процењује множењем кинетичке енергије у мањој цеви, са коефицијентом  $K_e$  који варира у односу на промене  $d/D$  [7]:

$$\Delta h_c = K_e \cdot \left( \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad (2.20)$$

За однос до  $d/D=0,76$ ,  $K_e$  се може приближно израчунати:

$$K_e = 0,42 \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right) \quad (2.21)$$

Однос  $K_e$ , је замењен коефицијентом  $K_{ex}$ , који се користи за нагло проширење. У наглим проширењима губитак се може извести из момента количине кретања, при чему се добија:

$$h_{ex} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = \left( 1 - \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g} = \left( 1 - \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g} = \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right) \frac{v_1^2}{2g} \quad (2.22)$$

где је:

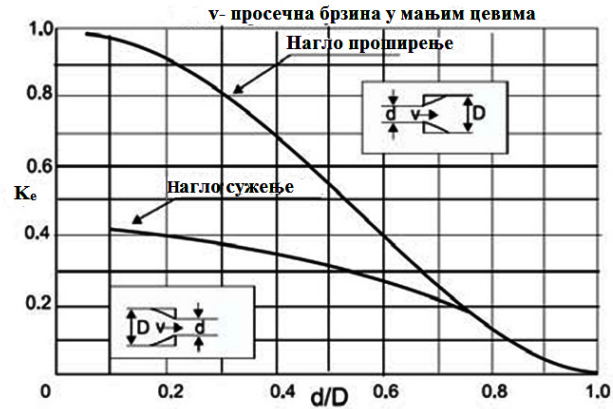
$v_1$  [m/s] - брзина струјања воде у мањој цеви,

$v_2$  [m/s] - брзина струјања воде у већој цеви,

$d$  [m] - пречник мање цеви,

$D$  [m] - пречник веће цеви.

На слици 2.6. дат је графички приказ вредности коефицијената  $K_e$  и  $K_{ex}$  као функција од  $d/D$ . Губитак се може смањити коришћењем постепене промене пречника цеви, конфузора за сужење или дифузора за проширење.



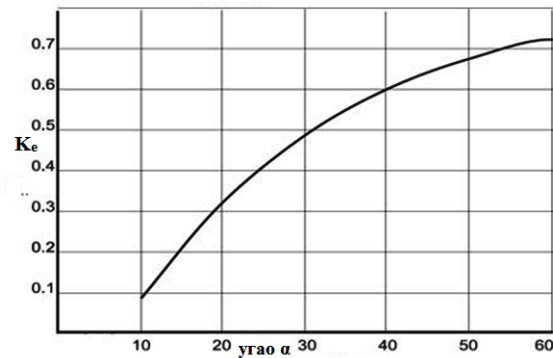
Слика 2.6.  $K_e$  и  $K_{ex}$  вредности као функција од  $d/D$ .

У конфузору губитак варира са углом, као што је приказано у табели 2.5., где су вредности  $K_e$  експерименталне:

Табела 2.5. Вредност  $K_e$  за конфузору.

| Угао[°] | $K_e$ |
|---------|-------|
| 30      | 0,02  |
| 45      | 0,04  |
| 60      | 0,07  |

У дифузору анализа феномена је сложенија. Слика 2.7. показује експериментално одређене вредности  $K_{ex}$  за различите углове дифузора.



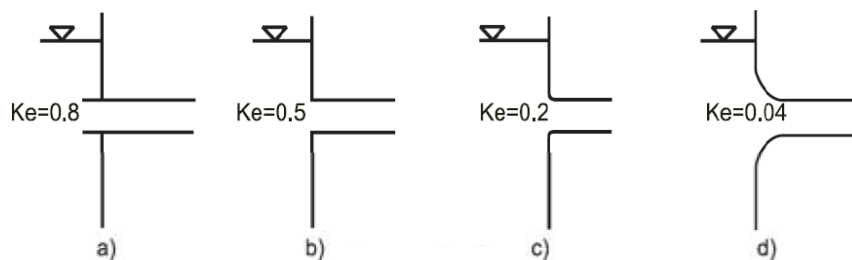
Слика 2.7. Коефицијент дифузора

Губитак је дат изразом:

$$h'_{ex} = K'_{ex} \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \quad (2.23)$$

Пражњење потопљене цеви у резервоару је екстреман случај наглог проширења, где за  $v_2$ , с обзиром на величину акумулације, у поређењу са брзином струјања у цеви, може сматрати да има вредност нула, па је губитак  $v_1^2/2g$ . С друге стране улаз из акумулације

у цеви је екстреман случај наглог сужења. Слика 2.8., показује вредност коефицијента  $K_e$  која множи кинетичку енергију  $v^2/2g$  у цевима.



Слика 2.8. Коефицијент улазних губитака

### 2.2.2.3. Губитак у кривинама и коленима

У кривинама, при струјању кроз цев долази до повећања притиска дуж спољашњег зида и смањења притиска дуж унутрашњег зида. Овај неуравнотежени притисак изазива секундарне струје. Оба струјања и уздужно и секундарно изазивају спирално струјање, у дужини од око 100 пречника. Губитак настао у овим околностима зависи од полупречника кривине и пречника цеви. Осим у погледу секундарног струјања, постоји и секундарни губитак услед трења, који зависи од релативне храпавости  $e/d$  [7].

Вредности  $K_b$  за различите вредности односа  $R/d$  и различите релативне храпавости  $e/d$ , приказане су у табели 2.6.

Табела 2.6. Вредност  $K_b$  за различите вредности односа  $R/d$ .

| Површина зида цеви | Угао $\alpha$ [°] | R/d   |       |       |       |       |
|--------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    |                   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| глатка             | 15                | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  |
|                    | 22,5              | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 | 0,045 |
|                    | 45                | 0,14  | 0,14  | 0,08  | 0,08  | 0,07  |
|                    | 60                | 0,19  | 0,12  | 0,095 | 0,085 | 0,07  |
|                    | 90                | 0,21  | 0,135 | 0,10  | 0,085 | 0,105 |
| храпава            | 90                | 0,51  | 0,51  | 0,23  | 0,18  | 0,20  |

Код бешавних цеви, губитак у кривинама под угловима испод  $90^\circ$ , је пропорционалан углу колена и вредности коефицијента  $K_b$  приказане су у табели 2.7.

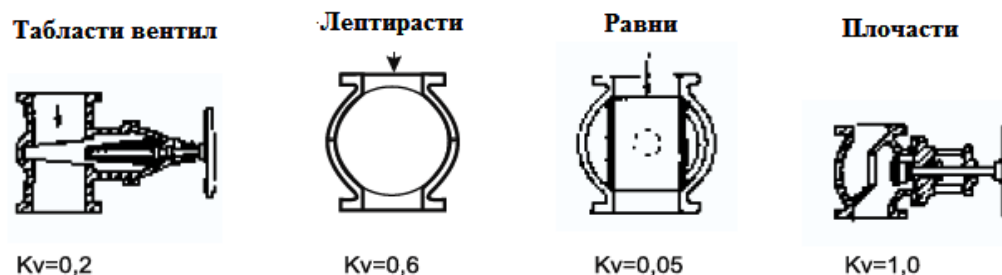
Табела 2.7. Вредност коефицијента локалног отпора у кривинама.

| $\alpha$ [°] |         | 5     | 10    | 15    | 22,5  | 30    | 45    | 60    | 90    |
|--------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $K_b$        | глатке  | 0,016 | 0,034 | 0,042 | 0,066 | 0,130 | 0,236 | 0,471 | 1,129 |
|              | храпаве | 0,024 | 0,044 | 0,062 | 0,154 | 0,165 | 0,320 | 0,684 | 1,265 |

Проблем је изузетно сложен када су кривине узастопно постављене једна за другом, довољно близу да се спречи стабилизација протока на крају кривине. Срећом, ово је редак случај у малим хидро шемама [1].

#### 2.2.2.4. Губитак у вентилима

Вентили или затварачи се користе у шемама малих хидроелектрана, да привремено изолују компоненте из система, тако да су оне или потпуно затворене или отворене. За регулација протока задужена су преткола (закола или копља код Пелтонове турбине). Коефицијент локалног отпора услед проласка кроз затварач зависи од врсте и израде вентила. Вредности коефицијената локалног отпора  $K_v$ , за различите врсте вентила приказане су на слици 2.9.



Слика 2.9. Коефицијент губитака за проток кроз вентил.

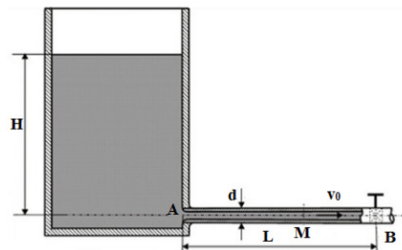
### 2.3. Појава хидрауличног удара

Израз хидраулични удар представља синоним за нестационарно струјање у цевоводима и добио је име због карактеристичног звука који се јавља током трајања дејства поремећајног таласа, а који личи на ударе чекића. Отуда и назив за овај феномен „водени чекић”. Ова појава се може најлакше описати ако се посматра физички систем резервоар - цевовод - вентил [8]. Услед нагле промене протока у цевоводу, изазване наглим затварањем вентила, долази до наизменичног (осцилаторног) појачавања и слабљења притиска, што се испољава низом удара у зид цеви. Удари се могу запазити и по звуку и по оптерећењу цеви, а њихово дејство може да изазове и хаварију цевовода.

Комплекс појава које настају у цевоводу због нагле промене брзине струјања, руски научник Жуковски, је први (1889. године), теоријски обрадио, односно, поставио диференцијалне једначине и нашао њихова решења. Због већих промена притисака до којих долази при хидрауличном удару, при објашњењу овог феномена мора се узети у обзир и стишљивост течности, као и еластичност цевовода. Кретање течности за време хидрауличног удара је осцилаторно, а захваљујући постојању трења осцилације се пригушују и током времена ишчезавају [9].

### 2.3.1. Развој хидрауличног удара

Појава хидрауличног удара се најбоље може описати неким примером као на слици 2.10. Из резервоара, чији се ниво сматра приближно константним, истиче течност густине  $\rho$ , кроз цев произвољне дужине  $L$ , пречника  $d$ , дебљине зидова  $\delta$ , која је направљена од материјала чији је модул еластичности  $E$ . Пречник, дебљина и модул еластичности су исти дуж цеви, па ће и средња брзина струјања флуида у стационарном стању бити иста у свим пресецима и нека је њена вриједност  $v_0$ . Ако се занемари трење флуида, притисак у стационарном стању је константан дуж цевовода и има вредност  $p$ . Заустављање струјања флуида кроз цевовод, било да је ручно или аутоматско, представља једну од најчешћих операција која се дешава током радних режима хидропостројења. Затварање вентила може да буде једна од рутинских операција која је предвиђена одговарајућим технолошким поступком у раду, а може да буде и једна од мера сигурности приликом испада неког од делова система из погона.

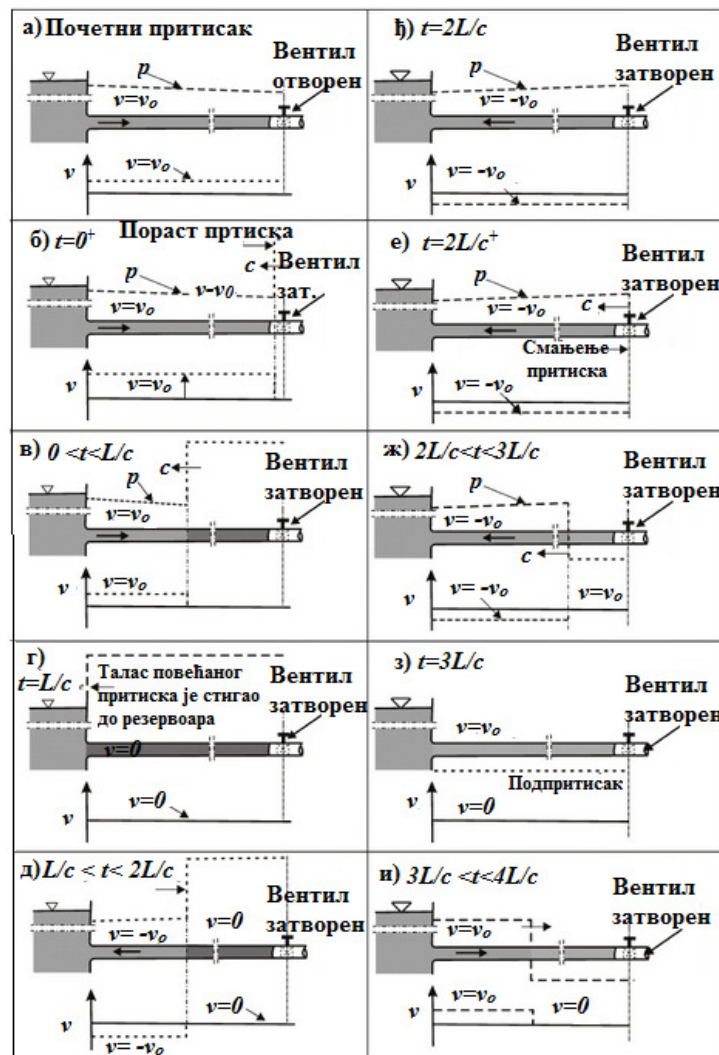


Слика 2.10. Хидраулични систем резервоар - цевовод - вентил.

На слици 2.11. је приказано простирање притисног поремећајног таласа, проузрокованог наглим затварањем вентила, кроз систем приказан на слици 2.10.

Нагло затварање вентила  $t=0^+$ , (слика 2.11. б) изазива заустављање слоја течности у његовој непосредној близини. У тренутку наглог затварања вентила притисак у слоју заустављене течности испред затварача нагло расте (од  $p$  на  $p+\Delta p$ , при чему  $\Delta p$  може бити знатно веће од  $p$ ). Повећање притиска за последицу има деформацију еластичног цевовода, повећање његовог пречника. Поред тога долази и до локалног повећања густине флуида. Поремећајни талас притиска креће се кроз систем брзином  $c$ , блиској брзини простирања звука. У наредном тренутку зауставља се следећи слој течности итд., све док се не заустави целокупна течност која се налази у цеви  $0 < t < L/c$ , (слика 2.11. в). Под претпоставком да се талас повећаног притиска креће константном брзином  $c$ , време потребно за заустављање течности у читавој цеви је  $L/c$ .

У тренутку  $t=L/c$ , (слика 2.11. г) талас повећаног притиска је стигао до резервоара. Притисак у тачки А са стране цевовода је  $p+\Delta p$ , са стране резервоара  $p$ , па ће услед разлике притисака доћи до истицања флуида из цеви у резервоар брзином  $-v_0$ , што ће имати за последицу растеређење цевовода са притиска  $p+\Delta p$  на почетну вредност  $p$ . Поремећајни талас се креће назад према вентилу, притисак иза таласа има вредност  $p$ , а брзина струјања флуида је  $-v_0$  у тренутку  $L/c < t < 2L/c$ , (слика 2.11. д) [8].



Слика 2.11. Простирање поремећајног таласа кроз систем.

У тренутку  $t=2L/c$ , (слика 2.11. ђ), поремећајни талас је стигао до вентила, док сва течност у цевоводу и даље струји према резервоару. Како је вентил потпуно затворен, у његовој непосредној близини у тренутку  $t=2L/c^+$ , (слика 2.11. е) нема течности која би одржала брзину струјања  $-v_0$ .

Ово за последицу има тренутну промену брзине са вриједности  $-v_0$  на нулу, што изазива пад притиска у тачки В на  $p-\Delta p$ . Услед пада притиска долази до смањења пречника цевовода и смањења локалне густине флуида. Талас смањеног притиска се креће према резервоару и изазива поновно заустављање течности у цеви у периоду  $2L/c < t < 3L/c$  (слика 2.11. ж). У тренутку  $t=3L/c$ , (слика 2.11. з) флуид је заустављен у читавој цеви и у сваком њеном пресеку влада притисак  $p-\Delta p$ . С обзиром да у овом тренутку притисак у тачки А са стране резервоара има вредност  $p$ , а са стране цеви  $p-\Delta p$ , долази до струјања флуида из резервоара у цевовод брзином  $v_0$ , притисак расте на вредност  $p$ , а поремећајни талас се креће назад према вентилу у периоду  $3L/c < t < 4L/c$ ,

(слика 2.11. и). У временском тренутку  $t=4L/c$  течност је доведена у првобитно стање кретања и у њој владају почетни услови, (слика 2.11. а). Како је трење занемарено, процес се наставља, а струјни услови се понављају у временском интервалу  $4L/c$ .

На основу изложеног види се да се притисак у тачки В мења наизменично од вредности  $p+\Delta p$ , до вредности  $p-\Delta p$ , са теоријским периодом цевовода  $2L/c$ , што се манифестује као низ удараца који би трајали бесконачно дуго када у систему не би било трења. Пораст притиска  $\Delta p$ , добијен након наглог затварања вентила, може се одредити помоћу формуле, Жуковског и она има следећи облик:

$$\Delta p = \pm \rho c \Delta v \quad (2.24)$$

при чему се знак „+” користи када поремећајни талас путује низводно, а „-” када путује узводно [8]. Притисни талас брзине  $c$ , зависи од еластичности воде и материјала цеви и рачуна се према једначини:

$$c = \sqrt{\frac{k \cdot 10^{-3}}{1 + \frac{k \cdot d}{E \cdot \delta}}} \quad (2.25)$$

где је:

$k$  [N/m<sup>2</sup>] - модул стишљивости за течност (воду),

$d$  [m] - унутрашњи пречник цеви,

$E$  [N/m<sup>2</sup>] - модул еластичности материјала цеви,

$\delta$  [mm] - дебљина зида цеви.

Време потребно да притисни талас стигне до вентила на свом повратку, након изненадног затварања, назива се критично време и рачуна се:

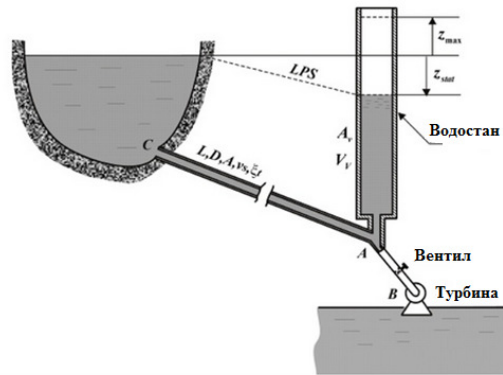
$$t = 2L/c \quad (2.26)$$

### 2.3.2. Заштита цевовода од хидрауличног удара

Као последица хидрауличног удара могу настати хаварије на хидрауличним инсталацијама. То указује да се заштити цевовода и осталих уређаја у хидропостојењима мора посветити одговарајућа пажња. Мере заштите састоје се како у предузимању свих потребних мера да до хидрауличног удара не дође, тако и у коришћењу одговарајућих заштитних уређаја. Врста заштитног уређаја као и место његовог постављања зависе од врсте и режима рада хидропостројења.

Нежељени ефекат се може смањити постепеним затварањем вентила. Уколико је време затварања  $t_c$ , мање од критичног времена  $t$ , долази до хидрауличног удара истог интензитета као и при тренутном затварању вентила, с том разликом што притисак

постепено мења интензитет између екстремних вредности. Уколико је време затварања вентила  $t_c$ , веће од критичног времена  $t$ , поремећајни талас притиска при повратку неће наићи на затворени вентил тако да ће ефекат хидрауличног удара бити знатно смањен. Експерименталним путем је утврђено да при лаганом затварању прираштај притиска постепено оствари релативно брзо отварање или затварање вентила, на постројењима хидроелектрана што је условљено променама оптерећења у електричној мрежи. У том случају се у циљу заштите ценовода од хидрауличног удара, користи се водостан, приказан као на слици 2.12.



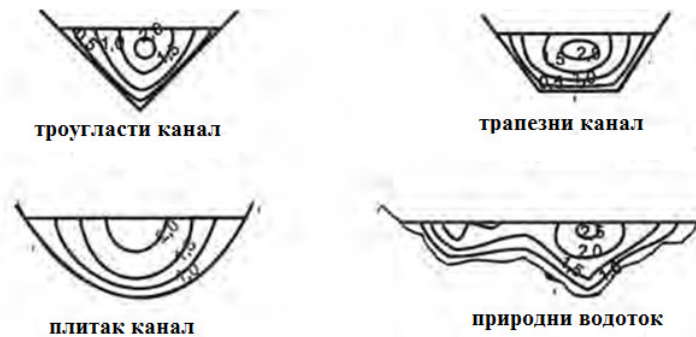
Слика 2.12. Систем са водостаном

Водостаном се назива резервоар постављен у хидроцентралама између акумулацијског језера и турбине, обично на месту где се ценовод прелама ка турбини. У периоду нормалног рада хидропостројења водостан има улогу пијезометра. Међутим, када дође до поремећаја у раду, односно до нагле промене протока, водостан има улогу да спречи преношење поремећајног таласа у доводни тунел, јер се о слободну површину воде у њему талас одбија и ослабљен враћа у ценовод. Истовремено, водостан прима део воде која по инерцији струји из акумулацијског језера, због чега ниво воде у њему расте. Постављањем водостана скраћује се дужина пута коју поремећајни талас прелази, а тиме и време фазе  $t$ , чиме се омогућава са већом вероватноћом постизање услова  $t_c > t$ .

## 2.4. Проток воде у отвореним каналима

У затвореној цеви вода попуњава целу цев, док у отвореном каналу постоји слободна површина. Ова слободна површина воде је изложена атмосферском притиску; која представља нулту референцу притиска и обично се сматра константом на уздужној површини канала. Ова чињеница пада притиска олакшава анализу, али у исто време уводи нову дилему. Дубина воде се мења са проточним условима, а на неустаљеним токовима њена процена је део тог проблема. Било која врста канала чак и прав, има тродимензионалну расподелу брзина. Познати принцип механике флуида је да свака честица у додиру са чврстом, непокретном страницом има брзину једнаку нули. На слици 2.13, приказане су линије расподеле брзина за канале различитих профила.

Математички приступ је заснован на теорији о граничном слоју, док се инжењерски приступ заснива на просечној брзини  $v$ .

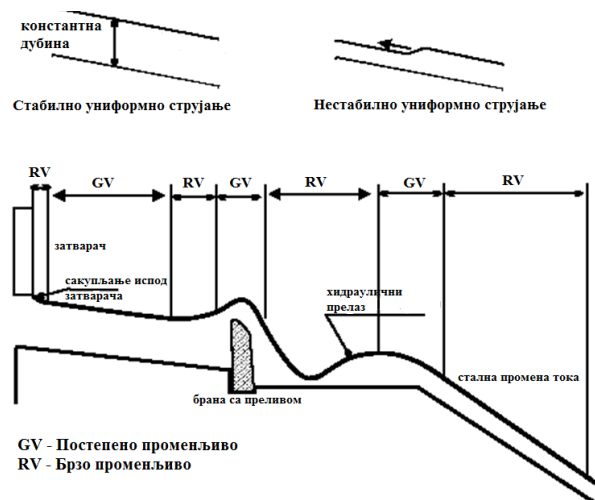


Слика 2.13. Расподеле брзине за протоке у отвореном каналу.

### 2.4.1. Класификација токова отворених канала

Струјање у каналу се сматра константним, уколико се дубина на сваком делу деонице не мења са временом, у супротном се сматра променљивим. Струјање у отвореном каналу се сматра униформним, ако се проток и дубина воде у сваком делу дуж канала не мењају са временом. Сматра се варијабилним када се проток или дубина воде мења током њене дужине. Миран варијабилни ток се обично оцењује као постепени или брзи [7].

На слици 2.14. представљене су различите врсте струјања: стабилно униформно, стабилно постепено променљиво струјање и стабилни брзо променљиво струјање.



Слика 2.14. Различитих врста струјања

Као и са анализом у потпуно затвореној цеви, за струјање у каналима такође се примењује Бернулијева једначина (2.3). Губитак енергије при струјању воде од пресека 1 до пресека 2 је означена са  $h_L$ .

### 2.4.2. Униформно струјање у отвореним каналима

По дефиницији струјање се сматра униформним када су:

1. Дубина, површина и брзина струјања воде у сваком попречном пресеку канала константне.
2. Линије енергетског градијента, слободне површине и дна канала, међусобно паралелне.

На основу ових појмова Шези је утврдио једначину за брзину струјања:

$$v = C\sqrt{R_h S_e} \quad (2.27)$$

где су:

- $C$  - Шезијев коефицијент,
- $R_h$  [m] - хидраулични радијус,
- $S_e$  [m] - нагиб дна струјног тока.

Многи покушаји су урађени да се одреди вредност коефицијента  $C$ . Манинг је коришћењем својих и резултата других експеримената, извео следећу емпиријску релацију:

$$C = \frac{1}{n} R_h^{1/6} \quad (2.28)$$

Где је,  $n$  - Манингов коефицијент храпавости (види поглавље 3, табела 3.2).

Заменом израза за  $C$  (2.28) у изразу за  $v$  (2.27), добија се Манингова формула за униформно струјање:

$$v = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_e^{1/2} \quad (2.29)$$

односно;

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S_e^{1/2} \quad (2.30)$$

Параметар  $A R_h^{2/3}$  је дефинисан као фактор пресека и за различите канале је дат у табели 2.8 (на крају поглавља). Формула је потпуно емпиријска и коефицијент  $n$  није бездимензиона величина, тако да ове формуле важе само у SI систему јединица. Ове формуле се примењују само на канале са равним дном. Анализа природних водотокова је сложенија, тако да се наведене формуле могу применити само за прву апроксимацију.

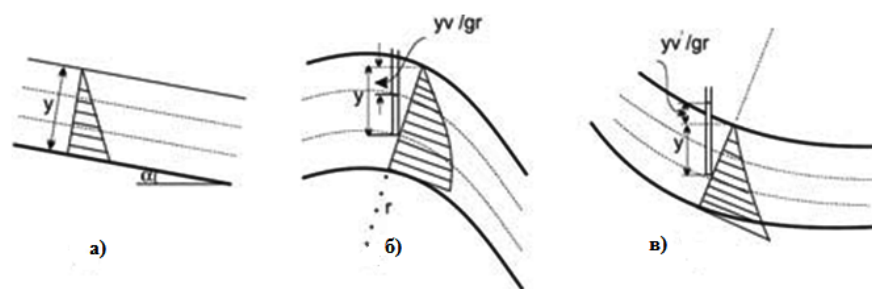
### 2.4.3. Ефикасан попречни пресек у отвореним каналима

Из претходних израза, може се закључити да у каналу одређеног попречног пресека површине  $A$  и нагиба  $S_e$ , проток расте са повећањем хидрауличног радијуса. То значи да је хидраулички радијус мера ефикасности. Како је хидраулички радијус однос површине  $A$  и оквашеног обима  $P$ , најефикаснији пресек је онај са минималним оквашеним обимом. Од свих попречних пресека, кружни има најмањи оквашени обим за дату површину. Нажалост, канали са кружним попречним пресеком су скупи за изградњу и одржавање, па се користи само у малим каналима који су израђени од префабрикованих елемената. За константну дубину тока најефикаснији је трапезни пресек, са углом од  $60^\circ$ . У шемама малих хидроелектрана најчешће се користи правоугаони облик канала, који се лако гради, непропустан је и лак за одржавање. Најефикаснији правоугаони пресек је онај код кога је дубина једнака половини ширине канала [7].

### 2.4.4. Енергетска једначина отвореног тока

Униформно струјање у отвореним каналима је најчешће стабилно, а нестабилни токови су прилично ретки. Ако су линије протока паралелне и ако се узме слободна површина воде као референтна раван, сума потенцијалне  $h$  и притисне енергије  $p/\rho g$  је константна и једнака дубини воде. У пракси, већина униформних токова и велики део устаљених, променљивих токова се може сматрати да су паралелни са дном.

На каналу са константним добро одређеним нагибом (слика 2.15. а), специфична притисна енергија у свакој потопљеној тачки је једнака вертикалном растојању, мереном од слободне површине до те тачке (дубина воде). Расподела оптерећења обично има облик троугла. Ипак ако вода тече по конвексној путањи, као што је прелив, центрифугално струјање је у супротном смеру од гравитације, и расподела оптерећења је искривљена као на слици 2.15. б. Притисна енергија је дата разликом између дубине и центрифугалног убрзања воде  $mv^2/r$ , где је  $r$  сада радијус кривине на конвексној путањи. Ако је путања конкавна, сила убрзања је додата дубини и расподела оптерећења је као на слици 2.15. в.



Слика 2.15. Расподела притиска за канале са вертикално закривљеним врхом

Због тога специфична притисна енергија, за водене токове дуж праве линије (а), конвексне (б) и конкавне (в) путање је респективно [7]:

$$\frac{p}{\rho g} = y, \quad (2.31 \text{ а})$$

$$\frac{p}{\rho g} = y - y \cdot \frac{v}{rg}, \quad (2.31 \text{ б})$$

$$\frac{p}{\rho g} = y + y \cdot \frac{v^2}{rg} \quad (2.31 \text{ в})$$

где су:

$y$  [m] - дубина мерена од слободне површине воде до дна канала, ( $y = h \cos \alpha$ );

$h$  [m] - као дубина тока нормална на дно канала;

$r$  [m] - полупречник кривине и крива тока пута.

Специфична енергија или енергија у односу на дно канала, у пресеку је:

$$H = y + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (2.32)$$

где је:  $\alpha$  - коефицијент који узима у обзир стварне расподеле брзина, посебно на пресеку канала, чија је просечна брзина  $v$  (Кориолисов број). Коефицијент може варирати од минималних 1,05 за веома униформне расподеле, до 1,20 за веома неједнаку расподелу. Ипак у прелиминарном приступу може да се користи вредност  $\alpha=1$ , реална вредност када је нагиб испод 0,018 је  $\alpha < 101$ . Једначина 2.32 тада постаје:

$$H = y + \frac{v^2}{2g} \quad (2.33)$$

Пресек канала са површином  $A$  и протоком  $Q$ , имаће специфичну енергију:

$$H = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (2.34)$$

Једначина (2.34) показује да, с обзиром на проток  $Q$ , специфична енергија у датом пресеку, је функција само дубине тока. Када је дубина тока у уцртана за одређени проток  $Q$ , у односу на специфичну енергију  $H$ , крива специфичне енергије са два ограничења је представљена на слици 2.16. Доња граница АС, је асимптотска на хоризонталној оси, а горња АВ на линији  $H=y$ . Тачка темена на кривој специфичне енергије представља дубину на којој проток  $Q$  може бити испоручен кроз пресек, уз минималну специфичну енергију. За сваку тачку изнад осе  $H$ , већу од  $A$ , постоје две могуће дубине. На мањим дубинама, струјање воде се врши већом брзином, а тиме и већом специфичном енергијом - буран (силовит) ток. На већој дубини, проток струјање

воде се врши мањом брзином, али са већом специфичном енергијом - миран ток. У критичном стању специфична енергија је минимална, а њена вредност се стога може израчунати изједначавајући први извод специфичне енергије (једначина 2.34) по  $y$  на нулу [7].

$$\frac{dH}{dy} = -\frac{Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dy} + 1 = 0 \quad (2.35)$$

Диференцијална област воде близу слободне површине је  $\delta A/\delta y = T$ , где је  $T$  [m]-ширина врха пресека канала (слика 2.16). По дефиницији:

$$Y = A/T \quad (2.36)$$

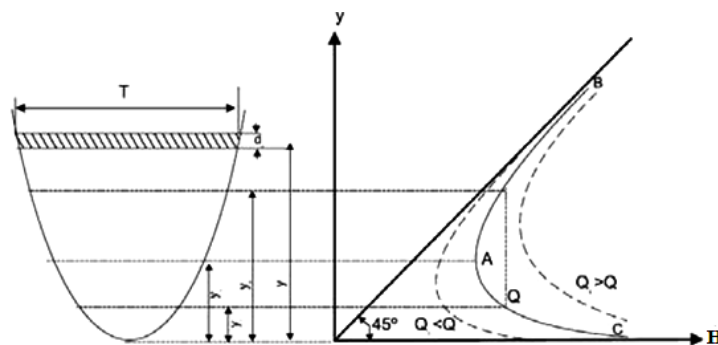
Параметар  $Y$  је познат као „хидраулична дубина” пресека и има кључну улогу у проучавању протока воде кроз канал. Заменом у једначини (2.35)  $\delta A/\delta y = T$  и  $A/T = Y$  добија се:

$$\frac{v}{\sqrt{gY}} = 1 \quad (2.37 \text{ а})$$

Где је:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gY}} \quad (2.37 \text{ б})$$

Број  $Fr$  је бездимензиони и познат је као Фрудов (*Froud*) број. Када је  $Fr = 1$ , као у једначини (2.37 а), проток је у критичном стању. Течење је бурно (силовито) када је  $Fr > 1$  и мирно када је  $Fr < 1$ . На слици 2.16, АВ линија представља бурне (силовите) токове и АС мирне токове. Као што је приказано на слици 2.16, сличне криве се могу извући из истих пресека и различитих протока. За веће протоке крива се помера удесно, а за мање протоке на лево [7].



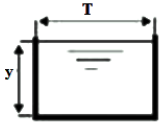
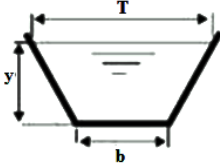
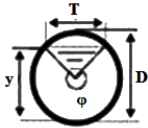
Слика 2.16. Специфична енергија у функцији проточне дубине.

У критичном стању  $y = y_c$  ( $y_c$  као критична дубина), помоћу једначина (2.37) може се за правоугаоне канале израчунати критична дубина, једначином:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (2.38)$$

где је:  $q=Q/b$  проток по јединици ширине канала. У табели табели 2.8, представљене су геометријске карактеристике различитих профила канала и критичне дубине различитих пресека канала[7].

**Табела 2.8.** Геометријске карактеристике различитих профила канала

|                                         |  |                                          |    |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Површина А</b>                       | $ab$                                                                              | $a \cdot (a \cdot \cot \varphi + b)$                                                                                      | $\frac{D^2}{2} \cdot (\varphi[\text{rad}] + \sin \varphi)$                            |
| <b>Оквашени обим Р</b>                  | $b + 2 \cdot a$                                                                   | $b + 2 \cdot a \cdot \sin \varphi$                                                                                        | $\frac{D \cdot \varphi[\text{rad}]}{2}$                                               |
| <b>Ширина канала Т</b>                  | $b$                                                                               | $b + 2 \cdot a \cdot \cot \varphi$                                                                                        | $D \cdot \sin \frac{\varphi}{2}$                                                      |
| <b>Хидраулични радијус R</b>            | $\frac{a \cdot b}{b + 2 \cdot a}$                                                 | $\frac{a \cdot (b + a \cdot \cot \varphi)}{b + 2 \cdot a \cdot \sin \varphi}$                                             | $\frac{D}{4} \cdot \left(1 + \frac{\sin \varphi}{\varphi}\right)$                     |
| <b>Дубина воде D (дубина тока)</b>      | $a$                                                                               | $\frac{a \cdot (b + a \cdot \cot \varphi)}{b + 2 \cdot a \cdot \cot \varphi}$                                             | $\frac{D}{8} \cdot \frac{\varphi[\text{rad}] + \sin \varphi}{\sin \frac{\varphi}{2}}$ |
| <b>Критична дубина <math>y_c</math></b> | $\left(\frac{Q^2}{g \cdot b^2}\right)^{1/3}$                                      | $0,81 \cdot \left(\frac{Q^2}{g \cdot \cot \varphi^{0,75} \cdot b^{1,25}}\right)^{0,27} - \frac{b}{30 \cdot \cot \varphi}$ | $\frac{1,01}{D^{0,25}} \left(\frac{Q^2}{g}\right)^{0,25}$                             |

### 3. Основни грађевински елементи малих хидроелектрана

Грађење мале хидроелектране није једноставан задатак, јер треба узети у обзир велики број пословних, инжењерских, финансијских, правних и административних аспеката у различитим развојним фазама, почев од избора места градње, па све до оперативне фазе електране. При изради малих хидроелектрана, неизоставан део су њена грађевинска, машинска и електро опрема, чија конструкција у многоме зависи од типа хидроелектране, локалних услова, доступности грађевинског материјала и локалних специфичности (односно традиције по којој се одвијају грађевински радови у том региону).

Најчешћи облици хидро - машинске опреме су:

- Бране и водојаже,
- Захвати,
- Водостан или водна комора,
- Испусти и преливи,
- Канали,
- Тунели,
- Цевоводи под притиском и
- Машинска зграда.



Слика 3.1. Шематски приказ једног хидропостројења

Функционисање једног оваквог система може бити представљено на следећи начин. Најпре се на погодном месту, одабраног речног тока подиже брана или водојажа, која је обично управна на правац тока. На растојању од око 20 m од ње налази се улаз у доводни канал, да гране, лед, шљунак и слично не би затворили улаз или продрли кроз улаз и оштетили га. Из истих разлога улаз је 1,5 до 2 пута шири од канала. Ако река прави оштре заокрете, онда се улаз поставља тангенцијално на ток реке, на спољашњој страни кривине, јер се вртлози обично јављају на унутрашњој страни кривине. Улаз је одвојен од реке грубом решетком која зауставља већа тела која пливају. Испод ове

решетке налази се праг преко кога вода улази у таложник у коме се таложе муљ и песак. Да би се таложник повремено очистио праве се посебни канали за испирање кроз које се подизањем устава за испирање одводе муљ и песак у речно корито из бране. Да би се доводни канал, ради чишћења таложника или из било ког другог разлога, могао затворити код таложника се поставља главна устава.

На крају доводног канала налази се разводник воде, који служи најпре за пропуштање воде у турбину као и за регулисање нивоа воде, односно пада који се у турбини користи. Разводник воде је обично шири и дубљи од доводног канала да би се у њему наталожили песак и муљ који су прошли кроз доводни канал. На крају разводника налази се фина решетка, а иза ње турбинска устава. У случају интервенција на турбини, турбинска устава се затвара, а вода се пропушта испод устава за пражњење, која је обично у непосредној близини. Са стране разводника налази се прелив преко кога се прелива сувишна вода, чиме се регулише проток кроз турбину, а и пад који она користи [1].

### 3.1. Брана или водојажа

Основни грађевински елемент код хидроелектрана је брана (водојажа), чија је главна намена као и преграда, односно насипа, да усмере воду према турбини. Такође бране уз то праве и додатни пад и акумулирају воду, када је водостај висок, за сушну сезону или акумулирају воду у периоду кад је потреба за електричном енергијом смањена. Наведене особине брана се користе код малих хидроелектрана које раде ван мреже, иначе се бране за мале хидроелектране ретко користе због великих инвестиционих трошкова. Мале хидроелектране које се налазе у оквиру система за наводњавање или водоснабдевање, се најчешће праве у подножју брана. Према ICOLD (International Committee of Large Dams), брана се сматра „малом” када јој висина, мерена од темеља до врха (круне) бране не прелази 15 m, дужина бране (мерена на врху бране) је мања од 500 m, а акумулација не прелази запремину од милион m<sup>3</sup>. Ови параметри могу бити важни због компликованих административних процедура које се обично односе на конструисање великих брана.

Између бране и водојаже се не може повући тачна граница. Бране су оне грађевине чија висина не прелази највиши забележен водостај реке на том месту пре подизања бране, док водојажа (или долинска преграда) је она брана, која има висину већу од највишег забележеног водостаја. Према томе, неће се много погрешити ако се уместо „водојажа” каже „брана”, док се за брану не би могло рећи да је водојажа, јер се водојажама називају само високе бране.

Бране и водојаже у хидро постројењу имају следеће задатке:

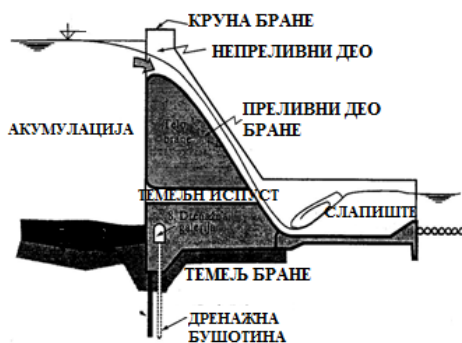
- да подижу ниво воде на висину коју желимо да користимо;
- да ниво воде одржавају на жељеној висини, допуштајући да се сувишна вода прелива преко њих или преко посебног прелива у њиховој близини;

- да стварањем вештачког језера акумулирају воду у периоду високог речног водостаја или кише и на тај начин створе резерве за више дана, недеља или месеци када је водостај тока смањен тј. потражња тренутног система већа;
- да омогуће лако „хватање” воде и њено скретање у вештачки створени ток ради коришћења у турбини;
- да смање брзину воде у отвореном току и тиме смање отпоре трења у току испред бране, услед чега се смањују губици енергије која нам је на располагању, а такође да се смањивањем брзине омогућава и таложење песка [1].

### 3.1.1. Делови бране

Бране могу бити изведене у веома различитим облицима, али све имају исте делове, који се у зависности од конструкције примењују на појединим типовима малих хидроелектрана. На слици 3.2. приказани су главни делови бране и то:

- а) тело бране,
- б) темељ,
- в) слапиште,
- г) веза са обалом.



Слика 3.2. Делови бране

Тело бране је онај део који зауставља воду и ствара успор, а састоји се од лица, леђа и круне (врха) бране. Лице бране или низводна страна преливних брана може имати такав профил, да се ивица поклапа са доњом ивицом преливног млаза. Лице бране се прави са падом обично много блажим него што је нагиб на леђима бране (код гравитационих брана), а који се одређује рачунски из услова стабилности и зависи од врсте материјала од кога је брана саграђена. Леђа бране или узводна страна су најчешће са нагибом који се креће до 1:20, а могу бити и без нагиба (вертикалне). Ако је за изградњу бране употребљен материјал који се слеже или га вода може лако спирати и односити, угао нагиба може бити и већи од 45°, а профил леђа бране степенаст. Круном бране назива се њен највиши део. Код преливних брана круна је заобљена у виду кружног или елипсастог сегмента, док се код непреливних брана обично изводи са оштрим ивицама. Ширина круне бране може бити од 0,3 m до 6 - 7 m и више, што зависи од растреситости материјала.

Темељ бране је део на коме је брана подигнута, а који се налази испод речног корита, па се због оптерећења тла, гради знатно шире од бране. Код покретних брана у темеље се постављају високи преливни прагови на које табле належу. Брана се не може поставити на обичном терену или где је носивост терена мала, већ се темељи копају док се не дође до стене или бар здравице. Ако терен има малу носивост, темељи се праве у виду велике плоче, да би се оптерећење по јединици површине подлоге смањило, или се прибегава забијању шипова ради везе са стеном, и сл. Испитивању терена на коме ће се брана подићи поклања се велика пажња, јер се иначе може десити да вода разбије и однесе брану.

Веза са обалом је исто тако важна као и темељ бране, нарочито код лучних брана, код којих се оптерећење преноси на бочне ослонце бране. У падинама обала или клисура, врши се дубоко усецање да би се дошло до здравог материјала који може да издржи велике силе.

Слапиште је онај део бране у који вода пада после преливања преко круне. Због велике количине воде коју мора повремено да прими, слапиште је изложено великим ударима воде која на њега пада, те је зато најосетљивији део бране и често се изводи у виду прагова. Слапиште се обично прави ниже од нивоа доње воде да би у њему увек био дебљи слој воде у који удара преливни млаз. „Водени јастук”, створен на тај начин, донекле ублажава ударце млаза и кроз ковитлање смањује кинетичку енергију воде. Тачно одређивање облика и димензија слапишта представља посебан проблем који се решава уз помоћ многобројних испитивања на моделима [2].

### 3.1.2. Подела брана

Постоји велики број различитих типова брана, а њихова подела на врсте, (обзиром на разне чињенице које карактеришу брану), се може извршити на следећи начин:

- према покретљивости,
- према положају у реци,
- према начину преношења оптерећења,
- према положају круне бране у односу на доњу воду,
- према врсти грађевинског материјала од ког су направљене [1].

Према покретљивости, бране могу бити сталне (непокретне) и покретне. Подела према покретљивости је најзначајнија јер се сталне и покретне бране, деле на већи број подврста (према начину израде, врсти материјала, и сл.) које се по конструкцији веома међусобно разликују.

Према положају у реци (правца уласка воде у канал) бране могу бити постављене као:

- праве и нормалне, када је брана постављена нормално на правац реке,
- косе, када је брана праволинијска, али постављена косо према реци,

- коленаста, када имају прелом,
- лучне, када је брана изведена у облику лука или као делови више лукова [2].

Према положају круне бране могу бити:

- Потопљене, када је ниво доње воде изнад круне бране;
- Преливне, код којих се вода прелива преко посебно обликованог преливног дела. Између потопљене и преливне бране често нема разлике, јер у летњим месецима, при малој води, ниска брана може бити преливна, а у пролеће и јесен, кад реке надођу, постати потопљена. То се дешава због тога што се ниво доње воде брже издиже него ниво успорене горње воде.
- Непреливне, код којих се сувишна вода не прелива преко круне бране, већ је за ту сврху саграђена посебан објекат. Ово је нарочито чест случај код водојажа.

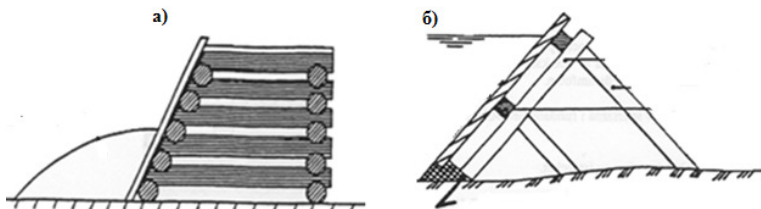
Према врсти грађевинског материјала од кога су израђене, бране се могу поделити на:

- насуте земљане бране,
- насуте камене (од каменог набачаја),
- бетонске (од класичног бетона),
- зидане,
- дрвене,
- металне [10].

### 3.1.2.1. Сталне бране

Сталне бране се праве: од дрвета, камена, од комбинације дрвета и камена, од земље, од зиданог камена („масивне“), од бетона и сл.

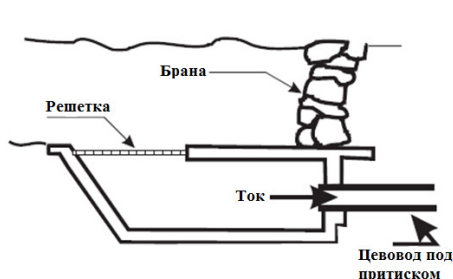
Дрвене бране су врло примитивне, а направљене су, било од греда положених ширином реке и учвршћених шиповима (слика 3.3. а), било од талпа, обрађених на перо и жлеб и пободених у земљу (слика 3.3. б). Ове бране се још увек могу наћи, иако због ограничене издржљивости их је све мање [1].



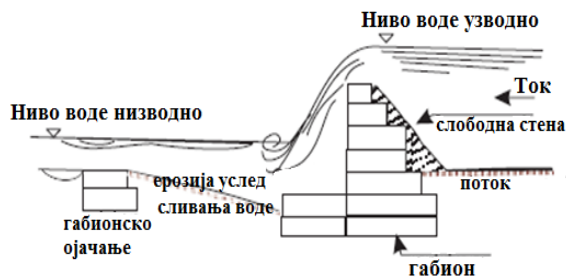
Слика 3.3. Пример дрвене бране

Бране од камене насlage такође су примитивне, и као и дрвене долазе у обзир само код врло малих падова (код постројења на потоцима). Унутрашњи део попуњен је ситним каменом, а површине се облажу великим камењем. Комбиноване бране од дрвеног скелета испуњеног каменом, знатно су јаче и трајније, те се могу употребити и за нешто веће падове. Процуривање се код ових брана спречава на тај начин што се бране

облажу даскама испод којих се ставља слој иловаче. Најједноставнији облик мале бране садржи камење поређано по ширини речног тока (слика 3.4.). Нешто сложенија конструкција, када је неопходно ископавање, је постављање мреже (корпе) од жице, преко камене конструкције која се назива габион (слика 3.5.) [7].



Слика 3.4. Камена брана



Слика 3.5. Брана од габиона

Од претходно набројаних брана, најзаступљеније су насуте и бетонске бране, па ће се у даљем тексту оне више проучавати. Ово је последица њихових добрих особина као и њихове прилагодљивости теренским приликама.

Бране у виду насипа представљају трајне водограђевине и примењују се нарочито много у иностранству (Америка, Италија, Норвешка). Развој насутих брана започет је у областима, где је било потребно сачувати сезонске падавине за сушне периоде. Основна карактеристика ових брана јесте да се могу градити на било којем тлу, односно могу се прилагодити скоро свим врстама терена (јер су потребни минимални захтеви за постављање темеља), а погодни су и за постављање у сеизмичким подручјима. Граде се од природних материјала као што су глина, песак, шљунак, дробљени камен и сл., што омогућава разноврсност у избору материјала за насип, па је њихово постављање брзо и економски прихватљиво. Осетљивост на преливање, процуривање и спирање материјала су главне мане насутих брана. Преливање преко насуте бране, поготово ако је оно дуготрајно, узрокује ерозију низводне стране, што може имати за последицу рушење бране. Насуте бране могу бити хомогене, зонске насипне бране (нехомогене) и насипне бране са мембраном [2].

Карактеристика хомогене бране је да се користе за ниске насипе мање од 4 m. Због безбедносних разлога код ових брана се увек обезбеђује нека врста дренаже слика 3.6.



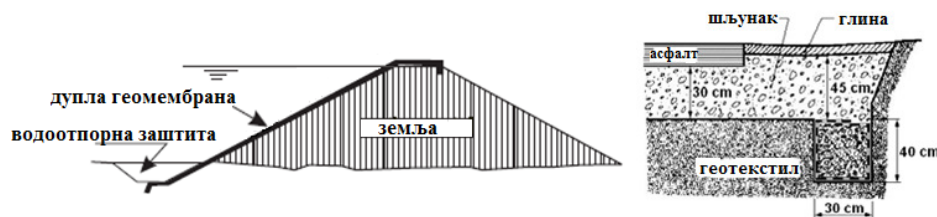
Слика 3.6. Насута брана хомогеног пресека с дренажом

У већим захватима може се користити мала земљана брана са непропусним језгром, које се простире до темеља, а налази се на централном делу бране. Језгро се обично

израђује од глине (слика 3.7.) осим ако овај материјал није доступан, онда се на лицу места поставља геотекстилни лист који покрива насип узводно, да би се обезбедила потребна хидроизолација (слика 3.8.).

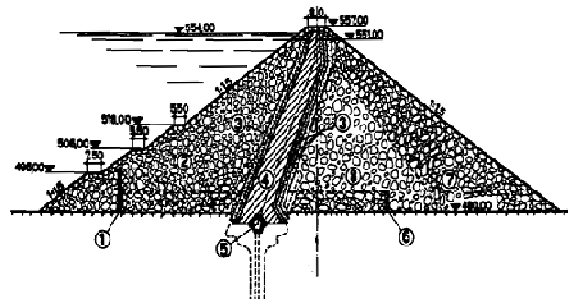


Слика 3.7. Брана са непропусним језгром



Слика 3.8. Брана са непропусном заштитом и дренажа од геотекстила (десно).

Зонске насипне бране (нехомогене бране) се користе за висине изнад 4 m. Конструисање је изузетно осетљиво и због тога је важно ангажовати искусне инжењере за надгледање радова. Критичне компоненте ових брана су језгро, прелазне зоне (филтери) који окружују језгро и капацитет дренаже, као на слици 3.9. [11].



Слика 3.9. Зонска насипна брана - попречни пресек:

1- узводна бетонска потпора, 2- камени набачај, 3- вишеслојни филтер, 4-глинено језгро, 5- ињекциска галерија, 6- низводна потпора, 7- квалитетнији камен, 8- лошији квалитет камена.

Још једна врста насипних брана су насуте бране са мембраном. Мембране могу бити направљене од бетона, асфалта или у форми геомембрана на узводном делу нагиба, а могу бити лоциране или узводно од насипа или вертикално у центру насипа [7].

За разлику од насutih, бетонске бране, осим чврстине треба да има још једну важну особину - непропустљивост, јер се у шупљине бетона пробија вода која се преко зиме смрзава и мрви бетон проширујући шупљине. У ту сврху армирани бетон се све више

употребљава, јер се његовом применом и потрошња материјала знатно смањује. Ради постизања непорозности нарочита пажња мора се посветити квалитету цемента, а често се у том циљу морају бетону додавати специјални састојци [2].

Уопштено бетонске бране се деле према статичкој функцији и паду, на:

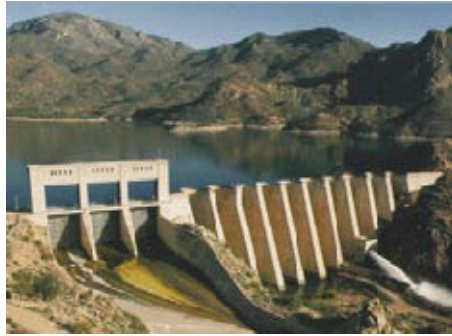
- гравитационе бране,
- потпорне бране,
- лучне и куполасте бране.

Код гравитационих брана стабилност зависи од њихове масе. Њихов пресек је базично троугласт да би се обезбедила адекватна стабилност и расподела напона преко основне равни, док је горњи део обично правоугаоног облика, да би се добила одговарајућа ширина врха за прелаз. Одабир конструкције укључује анализу стабилности (клизања и превртања), контролу оптерећења, температурне режиме у току изградње (да би се избегло пуцање) и контролу притиска на земљиште испод бране. За бетонске гравитационе бране, као на слици 3.10. битно је да тло на коме се граде има довољну носивост да прими тежину бране, као и оптерећење које брана преноси на темељ. Такође је битно да има малу водопропусност, јер нису погодне за потресна подручја.



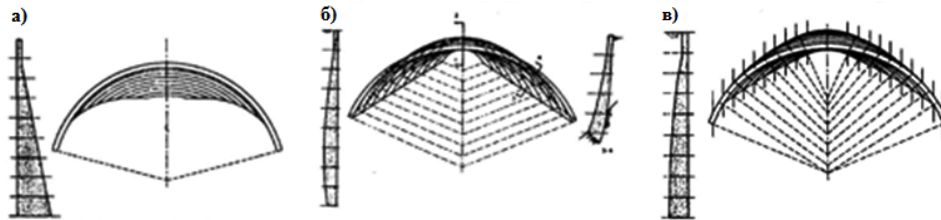
**Слика 3.10.** Бетонска брана

Потпорна брана се састоји од непрекидног узводног лица које је причвршћено подупирачима у одређеним размацама. Њихов попречни пресек је сличан као код гравитационих брана. Узводно лице је обично подељено вертикалним деловима, међусобно спојеним спојницама и сваки део је фиксиран подупирачем. У хладнијим климатским условима, узводно лице може бити осетљиво на замрзавање воде, па су из тог разлога потпорне бране у таквим местима често покривене низводно, дуж контура подупирача. Важно је знати да преливник такође има структуру подупирача (слика 3.11).



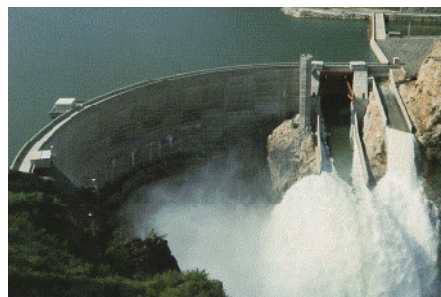
**Слика 3.11.** Потпорна брана

Најзахтевније конструкције бетонских брана су лучне и куполасте бране, које се састоје из хоризонтално постављених лукова који преносе притисак воде на бочне стене. Лучна брана може бити конструисана са константним радијусом преко висине бране (слика 3.12. а), различитим радијусом - куполасте бране (слика 3.12. б) и променљивим радијусом и променљивим луком (слика 3.12. в). Лучне бране са константним радијусом имају вертикалне и „равне“ попречне пресеке. Ова брана ће бити изложена вертикалним силама, јер ће деформација бране тежити да буде највећа у вертикалној оси. Ово захтева да се у великој мери ојача брана да би се избегло пуцање и цурење.



**Слика 3.12.** Типична геометрија за лучну и куполасту брану

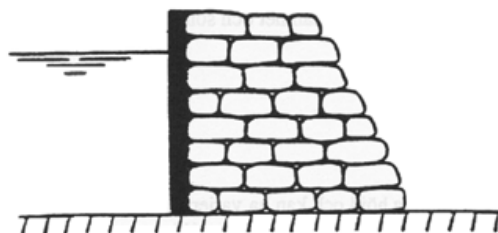
Куполасте бране су дизајниране да издрже притисак у свим правцима и на свим деоницама. Ово захтева да се полупречник кривине мења у односу на висину бране која има закривљени вертикални пресек. Лучне и куполасте бране су структурно ефикасне и у великој мери смањују потребну количину бетона. Оне захтевају, међутим, у уској долини терена јаку основу у стени и јаке бочне стране. Слика 3.13., је пример једне лучне бране.



**Слика 3.13.** Лучна брана

Уколико је компликовано обезбедити глиновити материјал, а доступни су песак и шљунак на локацији, може се прихватити изградња бетонске бране као решење. Ако је речни ток изложен честим поплавама који захтевају изградњу великих брана са преливом, земљана брана је скупо решење, па се граде бетонске бране са испустима интегрисаним у брани. Међутим уколико је изабрана локација на сеизмичком подручју, чврсте структуре, као што су бетонске бране треба избегавати, док су земљане бране погодне. У веома хладним климатским поднебљима, потребне су мере предострожности које треба предузети за изливање бетона, па би изградња бетонске бране била неекономично решење.

Зидане бране спадају у јаке и масивне, те се примењују као високе и широке водојаже. Пример једне зидане бране од камена, дат је на слици 3.14. Праве се од ломљеног камена, од камених или бетонских коцки, од бетона или армираног бетона. Зидане каменом се данас ретко употребљава, јер је подизање бетонске бране једноставније и брже, а осим тога, при зидању каменом велика пажња се мора посветити квалитету камена. С друге стране, бетонске бране захтевају одређене услове при постављању темеља, опсежне грађевинске радове, велике количине цемента и ангажовање грађевинских радника, што повећава јединичне трошкове [7].



Слика 3.14. Пример једне зидане бране, са узводним зидом.

Предности бетонских брана су:

- могу подједнако да се користе и за уске и за широке пролазе,
- нису осетљиве на бујице и плављења,
- испусти/преливи могу да се поставе на врху (круни) бране, а могу да буду постављени и целом њеном дужином,
- машинска зграда може да се постави у дну бране [2].

#### 3.1.2.1.1. Сигурност брана

Бране могу бити идентификоване као „једна вештачка структура способна да изазове највише смртних случајева“. Опасност од слабљења бране се у великој мери повезује са великим бранама и акумулацијама, али у зависности од локације и околности, мање и средње величине брана и акумулација могу бити потенцијално опасне. У Шведској, на пример, једна несрећа настала као резултат попуштања бране чија је висина мања од 4 m. Слика 3.15. показује две фотографије попуштања једне „мале“ бране.



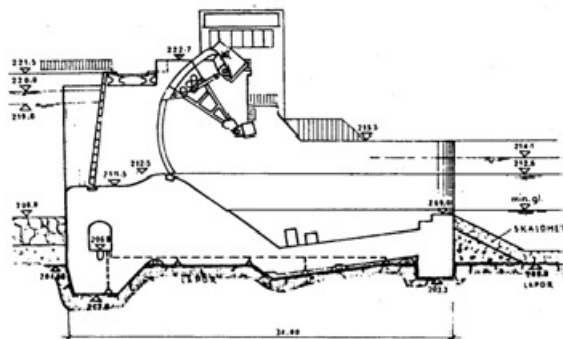
**Слика 3.15.** Пуцање једне мале бране и поплаве низводно

У циљу утврђивања потенцијално опасних брана већина земаља сада користе класификациони систем брана, где се захтева од власника да класификују своју брану. Ниво опасности је описан и идентификован коришћењем термина као што су низак, висок и значајан (USACE 1975.). Безбедност бране се може побољшати инсталацијом система за праћење рада и предузимања редовног прегледа бране [7].

### **3.1.2.2. Покретне бране и уставе**

Код сталних брана које раде са преливом ограничена је могућност регулисања нивоа горње воде, заправо тај се ниво воде регулише сам, висином преливног млаза. Да би се ниво воде одржао на мање или више сталној висини, круна преливне бране мора се спустити, а то значи да брана, или бар њен горњи део мора да буде покретан. Осим тога у пролеће и у јесен, потребно је пропустити велике количине воде, често неколико пута веће од нормалних протока. Овај проблем се решава на неколико начина:

- брана (обично водојажа), се прави тако да целом ширином буде непокретна, а сувишна вода се одводи преко посебних прелива и испуста, било у потпуности, било мањим делом преливањем преко круне бране, а већим делом преко посебних пропусних органа;
- брана је на целој ширини покретна (слика 3.16.);
- брана је на једном делу ширине реке непокретна, а на осталом делу покретна [2].



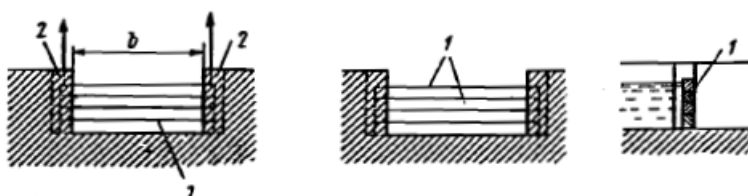
У односу на покретне бране, уставе су површински нископритисни затварачи који затварају пут води у отвореним токовима, а сматрају се покретним бранама малих димензија. Највећи број устава не прелази висину од 20 m. Према експлоатационим карактеристикама уставе могу бити главне или основне, помоћне (хаваријске, ремонтне и хаваријско - ремонтне) и привремене. Према конструкционим карактеристикама и условима руковања разликују се подизне, преклопне и специјалне уставе.

Подизне уставе, су мале покретне бране које подизањем с дна омогућавају испирање наталоженог наноса који се може нагомилати у акумулацијском простору и простору испред уставе. Према начину кретања подизне уставе могу бити:

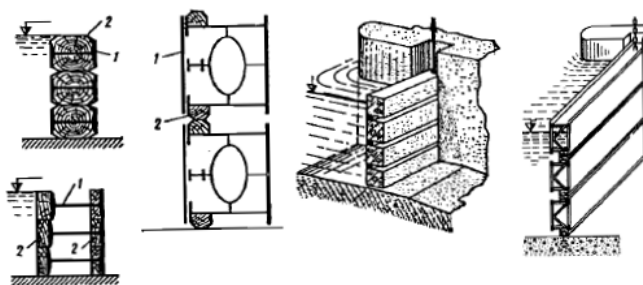
- с транслаторним кретањем (игличасте, гредне и плочасте) и
- ротационим кретањем око осовине изван тела бране (сегментне и ваљкасте).

Игличасте уставе су од дрвета, цеви или плоча и полажу се усправно, с нагибом низводно. На припремљено дно се обично полажу у лежиште од челичних „U” профила, а на површини се ослањају на челичну или дрвену гредну конструкцију. Ове уставе се искључиво користе као привремене.

Гредне уставе се састоје од хоризонталних дрвених греда слика 3.17., које такође могу бити и металне или комбинација ова два материјала, слика 3.18. Најчешће су направљене од храстових греда дебљине од 50 од 200 mm, међусобно везаних на перо и жлеб. Устава се поставља у оквиру од профилисаног гвожђа убетонираног у бочне стране и дна доводног канала. На горњем, водоравном делу рама, поставља се механизам за покретање уставе [10].

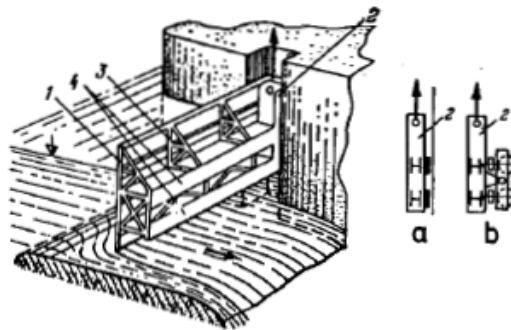


Слика 3.17. Дрвене уставе: 1- гредна конструкција, 2- жлеб.



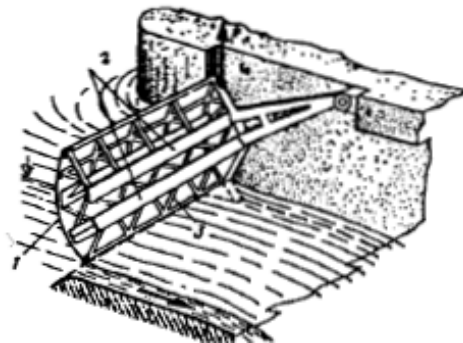
Слика 3.18. Комбиноване гредне уставе: 1 - челични профил, 2 - дрвена греда.

За разлику од претходних, плочасте или табласте уставе могу бити клизне, с точковима и ваљцима. Направљене су од дрвета или су челичне конструкције, као на слици 3.19. За мање хидростатичке притиске и мање распоне се изводе од дрвета, а честу примену имају у водопривреди на каналима за наводњавање. Покрећу се обично помоћу две зупчасте полуге с погоном преко заједничке осовине.



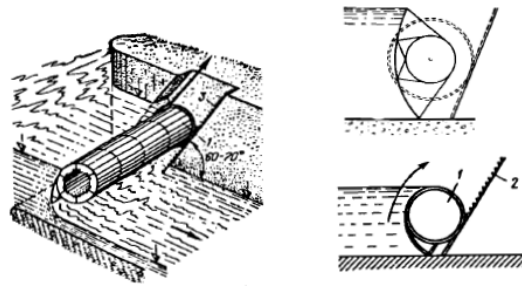
**Слика 3.19.** Плочаста устава: 1 - челична (дрвена плоча), 2 - носач лежаја, 3 - вертикална решетка, 4 - хоризонтални челични ваљани профил, а) клизни лежај; б) возни лежај

Сегментна устава је тип уставе који се окреће око хоризонталне осовине, а успор врши помоћу кружно или цилиндрично закривљених плоча. Тело сегментне уставе се наслања на две конзолне полуге које преко окретног зглоба у лежају, преносе силе на ослонце. Обртни лежаји се налазе изнад максималног нивоа воде која протиче преко преливне круне и прага. Једна таква устава је приказана на слици 3.20.



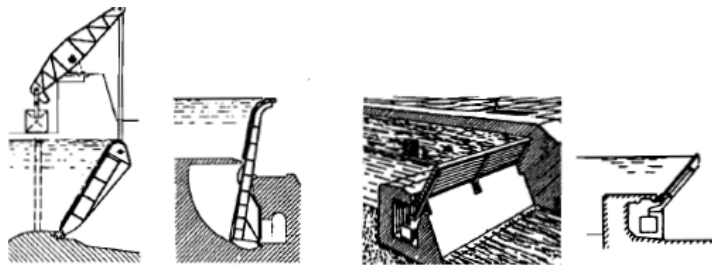
**Слика 3.20.** Сегментна устава: 1 - челична (дрвена плоча), 2 - хоризонтални носач, 3 - решетка.

Ваљкаста (цилиндрична) устава, је уствари шупаљ челични цилиндар који се покреће по косом жлебу, као на слици 3.21. Цилиндар је отпоран на торзију, па је довољно применити погонски механизам са једне стране. Оне су нарочито погодне за велике отворе између стубова, тј., примењују се код великих ширина проточних поља и мањих висина успорне воде.



**Слика 3.21.** Ваљкаста устава: 1 - устава, 2 - ланац за покретање, 3 - лежиште

За разлику од подизних, преклопне уставе се могу покретати са обе стране или једнострано, у лежајевима који су причвршћени дуж круне проточног поља. Преклопне уставе су конструисане као челичне уставе са успорном плочом од челичног лима, па се усправљају и подижу под притиском воде. Да би се то спречило стављају се противтегови, који се смештају у прагу испод уставе или изнад нивоа воде (слика 3.22).

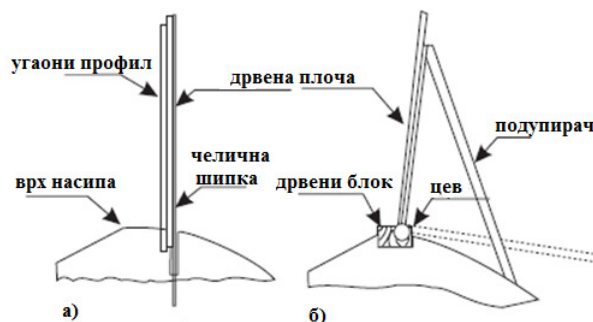
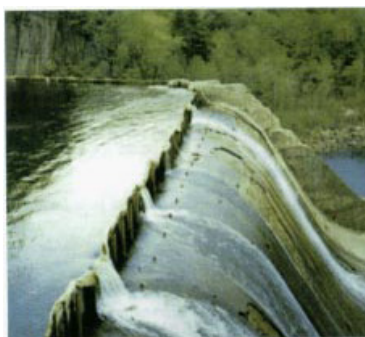


**Слика 3.22.** Шеме равних преклопних устава са противтегом.

Преклопне уставе се покрећу механичким путем моторима или хидраулички помоћу сервомотора - уљних цилиндара. Велике уставе се праве од гвожђа, слично као покретне бране само мањих димензија [10].

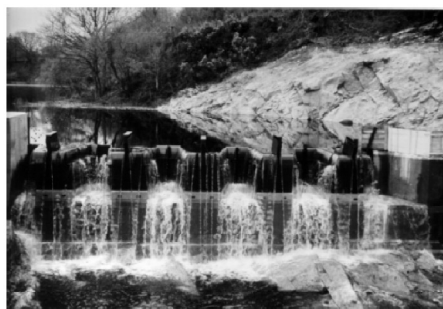
### 3.2. Додатни подизачи нивоа воде

Ради правилног коришћења бране, подижу се још и помоћни уређаји са справама и грађевинама. Да би се подигао и осигурао одговарајући ниво воде на круну бране или насипа поставља се нека врста грубе решетке (слика 3.23).



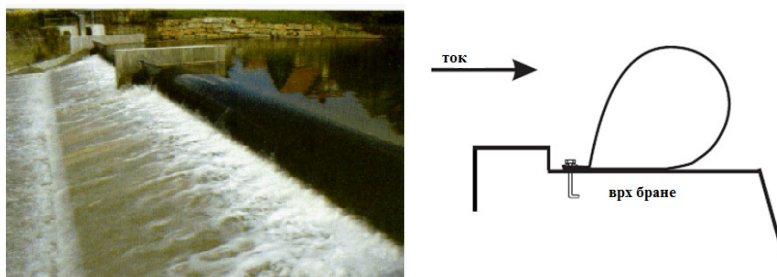
**Слика 3.23.** Груба решетка а) са уграђеним држачима, б) са подупирачем.

У случају када се налази на круни бране, груба решетка се прави од дрвета са челичним шипкама учвршћеним у челична постоља. Приликом бујица, да би се избегло плављење терена узводно од бране, неопходно је физички уклонити решетку, па је у том случају погодније коришћење решетки са зглобним механизмом. Код већих, али понекад и код мањих хидро постројења, саветује се изградња бране са вертикално покретним таблама (слика 3.24.). При великим бујицама, када вода премаши пројектовани ниво, једна или више табли (капија) се отворе, односно нагну и на тај начин се повећа прелив.



**Слика 3.24.** Брана са вертикално покретним таблама

Још један начин за подизање нивоа воде је систем на надувавање (слика 3.25.), који се користи уместо бетонске, дрвене или челичне решетки. Направљен је од посебне гуме, а има могућност даљинске контроле. Једноставан је за руковање, а захтеви за одржавањем су минимални, па су и инвестициони трошкови ниски. Као и било који други систем са капијама (вертикалним таблама) и овај систем ради по принципу пролаза.



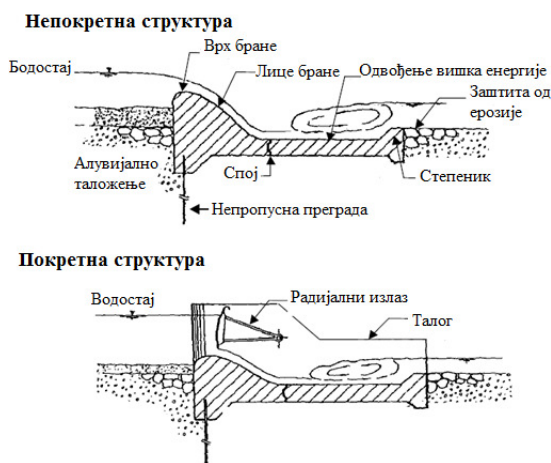
**Слика 3.25.** Начин подизања нивоа воде помоћу балона

Када се балон (мех) напуни водом или ваздухом капија се подиже, у супротном се капија спусти на круни бране и тада је потпуно отворена. Аутоматска контрола оваквог система може да се регулише тако да се при бујицама мех потпуно испразни. Када су управљање и оперативна сигурност система критичне, употреба оваквог система балона, може дати значајне предности у односу на конвенционалне системе [1].

### 3.3. Испуст (прелив)

Оштећење или пробијање бране може да има озбиљне последице на терен низводно од бране. Током радног века бране, река тече у најразличитијим условима, а брана треба да одговори на све те промене па се из тог разлога пажљиво пројектују пролази за вишак воде и представљају саставни део брана и захвата. Ови пролази се називају испусти односно преливи. Ако сама брана није предвиђена као преливна или покретна, онда се у њеној близини изграђују помоћни преливни уређаји за одвођење сувишне воде, помоћни уређаји за чишћење талог испред бране, пролази за рибе и сл. То се ради и када није пожељно да се преко сталне бране преливају сувише велике количине воде [1].

Прелив, односно помоћни преливни уређај је у ствари обична брана само знатно мањих димензија него главна брана, а може бити изведена као покретна или непокретна, што је и приказано на слици 3.26. За разлику од прелива, испусти су канали или цеви чији је задатак да брзо одведу велике количине воде за време тзв „катастрофалних вода“ или када је потребно испразнити језеро ради оправке бране. При нормалном раду испуст је затворен уставом [7].



Слика 3.26. Непокретне и покретне преливне структуре.

Непокретни захвати, мале бране и прагови су сигурне и једноставне конструкције, једноставни за одржавање и финансијски исплативи, али они немају могућност регулисања нивоа воде, па зато и висина нивоа и производња електричне енергије зависе од протока. Због велике брзине преливне воде, потребно је у подножју бране обезбедити неки конструктивни облик за одвођење вишка енергије. Пражњење (преливање) воде кроз преливе и испусте је најчешће веома критична појава са енергетског аспекта и уједно може да изазове озбиљну ерозију подножја бране. То је посебно изражено у случајевима када је речно корито богато земљом, муљем и глином.

Код речних токова код којих постоји значајна разлика између протока у летњој и зимској сезони, бујице и поплаве могу имати катастрофалне последице па су испусти неизоставни део брана и захвата. Најуобичајенији облик прелива - испуста је гравитациони (слика 3.27).



Слика 3.27. Прелив

У зависности од типа бране, постоје различите врсте прелива, чији се протоци дефинишу помоћу израза коефицијента протока (протицаја)  $C_d$  [-]:

$$Q = C_d b H^{\frac{3}{2}} \quad (3.1)$$

где су:

$Q$  [m<sup>3</sup>/s] - проток кроз прелив,

$b$  [m] - ширина врха прелива,

$H$  [m] - висина прелива тј. статички напор,

$C_d$  [-] - коефицијент протока, који зависи од типа бране и облика преливног отвора (слика 3.28).

| Тип                     | Конструкција | Проточни однос                                                                                                                                                                      | Карактеристика                                             |
|-------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Брана са оштрим врхом   |              | $Q = b \cdot \bar{C}_d \cdot H^{3/2} \cdot \sqrt{2g}$<br>$\bar{C}_d = 0.42$                                                                                                         | Једноставна конструкција<br>Економичност                   |
| Брана са широким врхом  |              | $Q = b \cdot c_e \cdot \bar{C}_d \cdot H^{3/2} \cdot \sqrt{2g}$<br>$\bar{C}_{d,mean} = 0.42$<br>$c_e = 1 - \frac{2 \sin \theta}{9(1 + \zeta_e^4)}$<br>$\zeta_e = \frac{H - w}{L_e}$ | Једноставна конст.,<br>подпритисак на врху<br>Економичност |
| Брана са заобљеним вром |              | $Q = b \cdot C_{dD} \cdot H^{3/2} \cdot \sqrt{2g}$<br>$C_{dD} = 0.494$<br>(for $H = H_D$ )                                                                                          | Највећи проток<br>Скупа конструкција                       |

Слика 3.28. Проточна карактеристика преливних брана

Брана са шиљатим врхом је једноставне конструкције и релативно исплатива. Посебна пажња, код овог типа преливне бране се мора посветити низводном облику лица,

горњег дела прелива, да би се обезбедио довољно велики пролаз воде преко прелива. Уколико млаз прелива удара у доњи део структуре, вибрације ће се из тока пренети на структуру бране.

Брана са широким врхом се често примењује за привремене структуре или структуре секундарног значаја, као што су за случај привременог скретања тока. Конструкцијски су једноставне и економичне. Хидраулични услови су далеко од оптималних, изражени ниским коефицијентом протока и са недовољним притиском дуж низводног лица преливног врха.

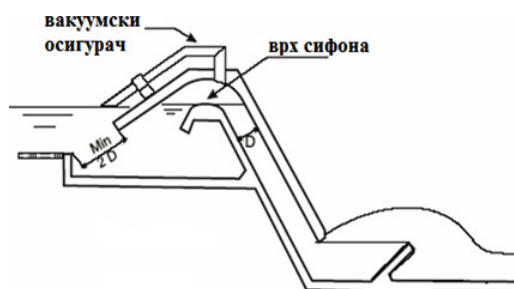
Брана са заобљеним врхом је хидраулички најбоље решење и даје највећи проток. За протоке који су знатно већи од предвиђених, подпритисци могу довести до кавитације и оштећења бетона на низводном лицу бране. За низводне водостаје који су једнаки или већи од нивоа преливног врха, преливник постаје постепено потопљен, тако да се одговарајући проток смањује [7].

Код малих постројења као што су системи за водоснабдевање код којих нема простора за конвенционалне преливе користе се испусти у облику „U” - профила (слика 3.29) [1].



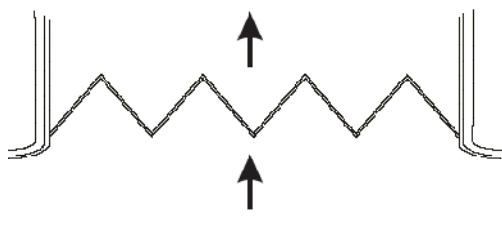
Слика 3.29. Испуст

Још једна могућност која је на располагању, уколико је простор за прелив ограничен је коришћење сифонског прелива, који помаже да се задржи ниво воде узводно у потребним границама. Сифонски прелив је у основи закривљен у каналу (слика 3.30). Када се ниво воде подигне изнад лакта од сифона, вода почиње да тече низводно као у преливу, али уколико ниво даље расте сифон повећа даље пражњење. Сифони су корисни када ниво воде достиже или прелази ниво врха, али постоје преливи где се одводњавање јавља када је узводни ниво порастао за трећину висине грла.



Слика 3.30. Шематски изглед сифонског прелива

У неким шемама малих хидроелектрана нема довољно места за постављање конвенционалних прелива. У овим случајевима, се користи брана облика „U” или лавиринтна брана приказана на слици 3.31., која треба да обезбеди већи проток на датој дужини.



Слика 3.31. Лавиринтна брана

### 3.4. Захват

Захватом се назива онај део хидропостројења који служи за хватање и довођење воде из реке или језера у доводни канал, тунел или код сасвим малих падова, непосредно у турбину. Задатак захвата је да задржи лед, дрво, шљунак, песак и друге наносе испред улаза, а ако су већ прошли у захват да их издвоји и спречи њихов одлазак у доводне органе. Најједноставнији облик захвата је обичан праг сазидан на дну корита, испред улаза у доводни канал [1].

Приликом конструисања водозахвата треба узети у обзир:

- хидрауличне и структурне (грађевинске) критеријуме (који су заједнички за све врсте захвата),
- оперативне критеријуме (нпр. проценат преусмереног тока, отклањање отпада и талога и сл., који варирају од захвата до захвата),
- еколошке критеријуме карактеристичне за све системе (нпр. системе за скретање риба или рибље пролазе).

Локација захвата зависи од низа фактора, као што су геотехнички услови, питање заштите животне средине, смањење талога и наноса леда, где је то потребно. Одређивање улаза захвата је кључни фактор у смањењу наслага отпада у акумулацији, који представља извор могућих проблема одржавања. Најбоља позиција захвата је да буде под правим углом у односу на прелив, тако да током сезона поплава, ток гура отпатке преко врха бране. Захват не треба да буде смештен у деловима површине мирне воде, далеко од прелива, јер вртложне струје у таквим водама нагомилавају отпад на улазу. Захват треба да буде опремљен решетком (која има задатак да смањи количину отпада и седимената који се нагомилавају услед надолажења воде), таложником (где би се смањила брзина воде за уклањање свих честица димензија преко 0,2 mm), уставом за испирање депонованог муља, песка, шљунка са минималним губитком воде и преливом за скретање вишка воде.

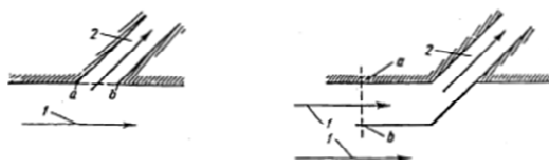
### 3.4.1. Типови захвата

Прво што пројектант треба да уради јесте да изабере који тип захвата одговара изабраном решењу мале хидроелектране. Постоји велики број различитих конструктивних решења захвата, који се могу класификовати на:

- захвате у којима се вода испоручује другим хидротехничким грађевинама за транспорт воде (отвореним и затвореним каналима, тунелима и сл.) (слика 3.1.),
- захвате у којима се вода испоручује притисним цевоводом директно до турбине (слика 3.4),
- системе код којих не постоји „класичан” захват, као што је сифонски (слика 3.30).

У случају да су у питању вишенаменски резервоари (наводњавање, водоснабдевање, итд.) могућа су и другачија решења (селективни захвати за воду) [3].

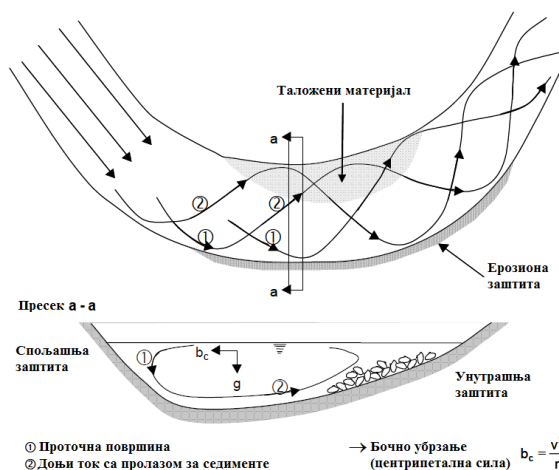
Према положају водозахвата (којима се вода испоручује другим хидротехничким грађевинама за транспорт воде) и улазне грађевине разликују се бочни и чеони захват (слика 3.32).



Слика 3.32. Бочни и чеони захват

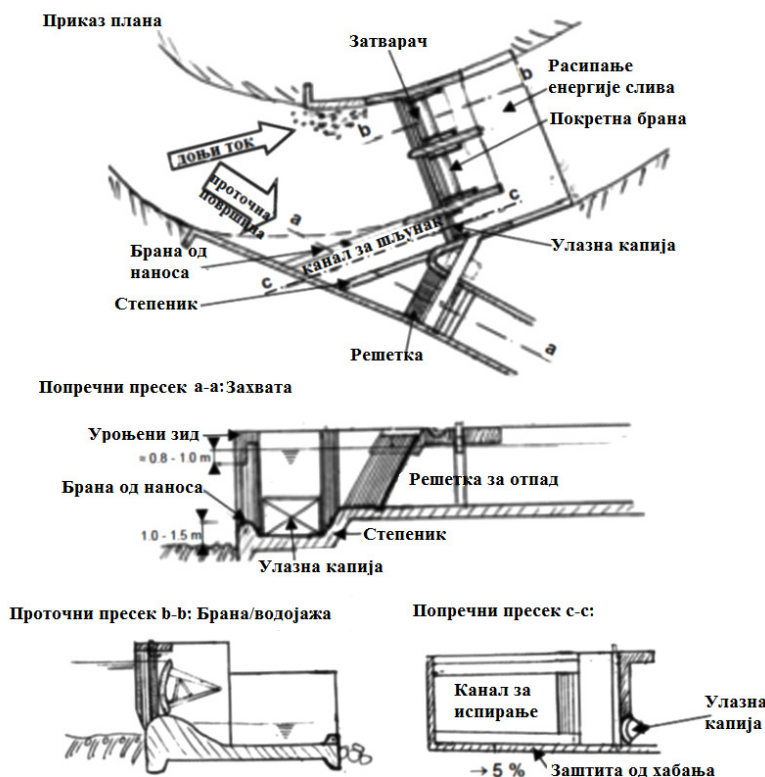
1 - водоток, 2 - канал

Бочни захват функционише помоћу кривине реке (слика 3.33) или коришћењем канала за таложење шљунка (слика 3.34). Овај захват је погодан за примену код јаким секундарних струја дуж спољне кривине реке. Ова струја спречава да речни нанос уђе у захват. Инсталирани проток мора бити мањи 50% од критичног протока реке, који се дефинише као проток за који почиње транспорт речног наноса.



Слика 3.33. Секундарна струјања у речним кривинама.

Друга врста бочног захвата користи канал за депоновање шљунка испред захвата у циљу спречавања талога и заустављања оптерећења да уђе у захват. Код оваквог захвата не постоји ограничење протока. Канал омогућава коришћење наноса за брану од минимум 1 - 1,5 m. Осим тога, његов нагиб треба да буде најмање 2%, по могућству 5%. Дно канала мора да буде заштићено од абразије (користи се квалитетан бетон, камење, итд.). Делимично потопљен зид (0,8 - 1,0 m) је постављен у циљу спречавања наслага да уђу у захват. Главни елементи структуре бочног захвата су дати на слици 3.34., а ту спадају покретна брана или водојажа, канал за таложење шљунка и захват са решетком.

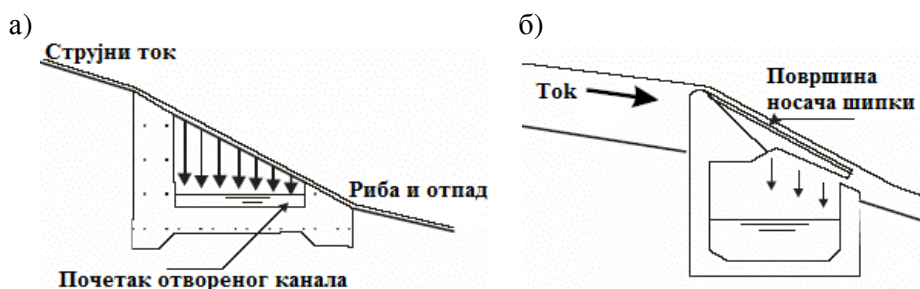


Слика 3.34. Изглед бочног захвата

Предњи захват је увек опремљен тунелом за таложење шљунка и добро се прилагођава на праволинијске речне токове. Таложни тунел се непрекидно испира уколико је максимална ширина реке 50 m. Главна предност овог типа захвата је у његовој способности да управља великим количинама наноса и да смањи оптерећење. Међутим то захтева стално испирање, а тиме и велике губитке воде.

У посебну групу захвата у којима се вода испоручује другим хидротехничким грађевинама спадају захвати са падом (тзв. „тиролски решеткасти захват” и „решеткасти захват са коанда ефектом”) који се углавном користи на водотоковима са врло стрмим водотоковима у високим планинским тешко приступачним пределима. Тиролски захват (слика 3.35.) је у суштини један канал изграђен у кориту тока, протеже

се преко њега, а прекривен је решетком са нагибом већим од нагиба речног тока. Отвори решетке су усмерени у правцу струјног тока. Слика 3.36., захват са падом постављен на планинском потоку у Шпанији.



**Слике 3.35.** *Тиролски захват са решетком а) оригинално решење, б) унапређено - са конзолно постављеним решеткама*

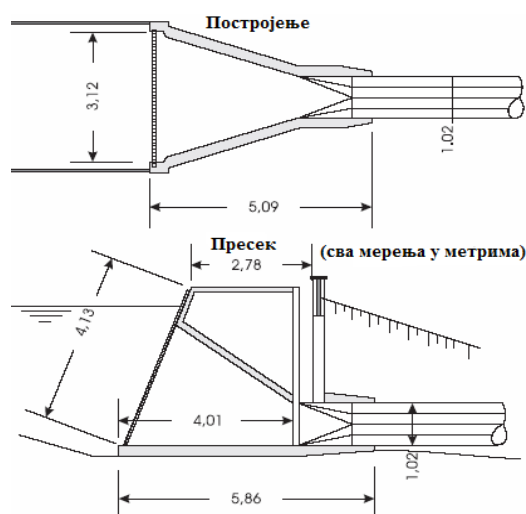


**Слика 3.36.** *Захват са падом*

Тип површине са коанда ефектом је напредни концепт захвата са падом, укључујући и „Коанда ефекат”, добро познат у индустрији сепарације руда, којим се одвајају рибе и талог из воде. У суштини састоји се од бране и профилисане површине мреже (жице) направљене од нерђајућег челика, на низводном делу тока и канала за прикупљање испод мреже (као захвата са падом). Мрежа од жице је постављена хоризонтално, са троугластим делом да би се обезбедила довољна ширина за пролаз воде. Вода пада преко мреже, док се отпад и риба уклањају са површине. Површина може да заустави 90% чврстих материјала, величине око 0,5 mm, тако да муљ и талог из слива овим системом изостаје.

Избору, пројектовању и изградњи захвата којим се вода води до притисног ценовода (директно из акумулације или из канала) до турбине мора се посветити посебна пажња. Вода се од њих води притиском и проблеми у вези са овим врстама захвата су другачији. Нпр., приступ решетки треба да буде изведен тако да се што је могуће више смањити раздвајање тока и губитке напора, прелаз са правоугаоног попречног пресека водостана на кружни попречни пресек ценовода, изградња стубова који носе механичку опрему (решетку и уставе за одражавање), усмеривачи који равномерно усмеравају ток, спречавање стварања вртлога, и сл.

За мале хидроелектране, губици енергије могу бити значајни за изводљивост пројекта и стога их треба свести на минимум, колико је то могуће. Најчешће се код захвата губици енергије смањују правилним одабором конструкције захвата. Профил брзина обично утиче на конструкцију отпадне решетке. Брзина у захвату може да варира од 0,8 -1 m/s преко решетке, на 3-5 m/s кроз цевовод под притиском. Дobar профил ће постићи равномерно убрзање тока, уз минимизирање губитака. Изненадно убрзање или успоравање тока ствара додатну турбуленцију и раздвајање тока и повећава губитке енергије. Нажалост константно убрзање са ниским губицима, захтева сложен и дугачак захват, што је скупо решење. Треба постићи баланс између цене и ефикасности. Максимална прихватљива брзина зависи од пречника цевовода под притиском. Потреба за разумном брзином тока која се приближава решетки, одређује димензије правоугаоне секције.



Слика 3.37. Захват до цеви под притиском а) из канала б) из акумулације

Анализа указује да је најбоља конструкција компактни захват са косо постављеном решетком (слика 3.37 б) и зидовима који се сужавају, док дужина захвата није главни фактор који доприноси укупном коефицијенту губитака. Коефицијент локалног отпора прелазног профила је 0,19 па је губитак енергије у [m] на захвату дат једначином:

$$\Delta h = 0,19 \frac{v^2}{2g} \quad (3.2)$$

где је:  $v$  [m/s] - брзина у цевоводу под притиском.

### 3.5. Решетка за отпад

Једна од главних функција захвата је смањење количине отпада и седимената који се јављају са наиласком воде, тако да се отпадна решетка поставља на улазу да би спречила продор пливајућег отпада и великог камења. Отпадна решетка се састоји од једног или више панела, направљених од низа равномерно распоређених паралелних

металних шипки. Уколико водоток у сезонама поплава, садржи велики отпад, погодно је испред обичне решетке поставити специјалну решетку, са преносивим и широко распоређеним шипкама, (од 100 mm до 300 mm између шипки) да би се смањио рад аутоматске опреме за чишћење решетки.

Отпадне решетке се производе од нерђајућег челика или пластике. Пошто пластичне шипке могу бити аеро - профилисаних делова, мања турбуленција ће као резултат имати мање губитке енергије. Размак шипки варира од ширине 12 mm, за мале падове код Пелтон турбина, до максималних 150 mm, код великих пропелерних турбина. Отпадна решетка треба имати нето површину (укупна површина шипки мања од предње површине), тако да брзина воде не прелази 0,75 m/s на малим захватима, или 1,5 m/s на великим захватима, да би се избегло повлачење плутајућег отпада са решетке. Отпадна решетка може бити или причвршћена за рам (завртњевима од нерђајућег челика) или клизна (на вертикално постављеним рамовима), да би се могла скинути и заменити, када није у функцији због чишћења или поправке, уколико је то потребно. Код великих решетки се мора претпоставити да може доћи до зачепљења решетке, па изабрана структура мора бити пројектована тако да се одупре укупном притиску којим вода делује на целокупну површину, без превелике деформације.



Слика 3.38. Монтажне гране



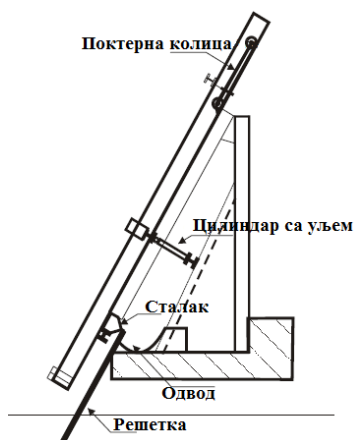
Слика 3.39. Опрема за решетку

Када река наноси тежак отпад, плутајући заштитник од дрвеног грађа, може бити лоциран испред решетке. Најједноставнији заштитни сплав од дрвета састоји се од низа плутајућих комада дрвета повезаних на самом крају кабловима или ланцима. Међутим, савремене решења су направљена са монтажним деловима од челика и пластике (слика 3.38) ојачане челичним кабловима. Њихова локација је критична, јер њихова унутрашња повијена конфигурација не дозвољава самопречишћавање током поплавних периода. Слика 3.39. показује прилично сложену опрему решетке конструисане за двоструке намене, а која спречава чамцима прелаз преко прелива и штити суседни захват. Део носача је окретан на једном крају, док је други фиксиран, тако да чекрци могу на другом крају пропустити отпад преко прелива, када су велике количине које пролазе. Отпадна решетка је конструисана тако да брзина на улазу ( $v_0$ ), буде између 0,60 m/s и 1,50 m/s. Површина решетке се одређује следећом једначином:

$$A_r = \frac{1}{K_1} \left( \frac{t+b}{b} \right) \frac{Q}{v_0} \frac{1}{\sin \varphi} \quad (3.3)$$

$K_1$  је коефицијент који се односи на делимично зачепљење површине решетке (аутоматска грабуља 0,20 - 0,30; аутоматска грабуља са временским програмером 0,40-0,60; аутоматска грабуља са диференцијалним сензором притиска 0,80-0,85).

Чишћење отпадних решетки је важно да би се смањио евентуални губитак пада кроз систем. Ручно чишћење је веома тешко, нарочито током поплава, па се препоручује механичко чишћење. Отпадна решетка треба да буде преносива за поправку и одржавање опреме и објеката и да би се олакшало њено чишћење. Да би се олакшало ручно чишћење, решетку треба нагнути под углом од  $30^\circ$  у односу на хоризонталу, мада се и већи углови често користе. Решетка се може чистити руком до 4 m дубине и у ту сврху треба обезбедити хоризонталну платформу изнад водостаја да би се рад олакшао. На модерним електранама то се регулише даљинском контролом, преко механичких грабуља. Механичка грабуља може бити конструисана да се управља њоме било на временској бази или на основу диференцијалног пада. Друге користе сензор за детекцију пада преко решетке. Акумулација отпада на решетки ствара повећање разлике у паду преко решетке. Грабуља почиње са радом када се оствари одређена разлика у паду.



Слика 3.40. Уљно - хидраулични цилиндар



Слика 3.41. Телескопски хидраулични цилиндар

Грабуља на слици 3.40 се управља преко уљно - хидрауличног цилиндра. Секундарни цилиндар истискује или увлачи грабуље, које су постављене на покретном зглобу. Грабуља се спушта до дна површине, а затим увлачи отпад на повратку дуж површине. Сама грабуља се састоји од низа испупчених крака од полиамидних блокова, који се крећу дуж простора између решетки. Отпад се преноси до врха где се одлаже на канал или транспортер. Ако се пропушта кроз канал, мала пумпа за воду испоручује довољно воде за спирање отпада дуж канала. Проблем одлагања смећа се мора решавати од случаја до случаја, имајући у виду да грабуље уклањају велике количине отпада. Када је отпадна решетка веома дуга, грабуља за ђубре се поставља на колица која могу да се крећу по шинама дуж захвата. Аутоматска контрола може бити програмирана да се креће дуж потпорне конструкције шина. Коришћењем телескопских хидрауличних

цилиндара, грабуље могу да достигну до 10 m дубине, која у комбинацији са готово неограниченим хоризонталним кретањем, омогућава да се очисте велике површине (слика 3.41.) [7].

### 3.6. Доводни органи

Довођење воде од захвата до улаза у турбину може бити изведено на најразличитије начине. Типични и најчешће употребљавани начини довођења воде од захвата до улаза у турбину су:

- довођење каналом са слободном површином воде (отворени или затворени канали);
- довођење кроз цев под притиском или кроз тунел;
- довођењем без канала и без цеви, непосредно из реке у турбину.

Између основних начина довођења воде постоји много других прелазних облика са применом сифона, аквадукта, помоћних резервоара и сл. Тако се, нпр., вода може довести каналом или тунелом до неке тачке, а да се од ње даље води помоћу цеви под притиском. Који ће се начин довођења воде усвојити зависи с једне стране од величине протока и укупног пада, а с друге стране од околног терена, односно од општег решења хидропостројења. У сваком случају доводни органи треба да испуне следеће услове:

- да не пропуштају воду,
- да су губици у њима најмањи уз одговарајућу економичност грађења;
- да имају што дужи век трајања;
- да захтевају минимално одржавање;
- да омогуће води да кроз њих што мирније протиче [2].

#### 3.6.1. Канали са слободном површином воде

Проток који се преноси каналом је функција попречног пресека профила, нагиба и њене храпавости. Природни канали су обично веома неправилног облика, а њихова промена површинске храпавости се мења временом. Примена хидрауличне теорије на природни канал је комплекснија него за вештачке канале, израђене од конструктивних материјала (земља, бетон, челик или дрво), код којих је попречни пресек исти по облику и површинској храпавости, тако да примена хидрауличне теорије даје поуздане резултате.

Проток у каналима се уопштено у грубо турбулентној зони, може рачунати применом Манингове једначине:

$$Q = \frac{A \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} = \frac{A^{5/3} \cdot S^{1/2}}{n \cdot P^{2/3}} \quad (3.4)$$

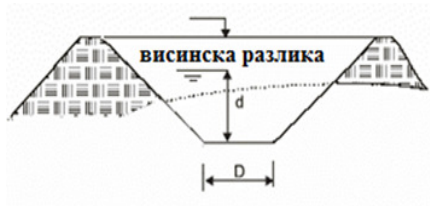
где је:  $n$  - Манингов коефицијент, који се у случају код вештачки обложених канала може са сигурношћу проценити (табела 3.1), а  $S$  - хидраулички градијент, који је обично нагиб канала, а добија се једначином:

$$S = \left( \frac{Q \cdot n \cdot P^{2/3}}{A^{5/3}} \right)^2 = \left( \frac{Q \cdot n}{AR_h^{2/3}} \right)^2 \quad (3.5)$$

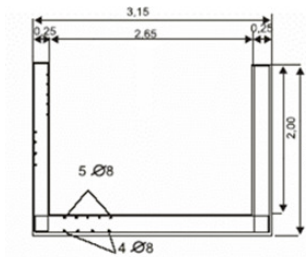
**Табела 3.1:** Вредност Манинговог коефицијента за различите врсте канала.

| Тип канала                       | Манингов<br>коефицијент<br>$n$ |
|----------------------------------|--------------------------------|
| <b>Ископани земљани канал</b>    |                                |
| Чист                             | 0,022                          |
| Шљунковит                        | 0,025                          |
| Растиње                          | 0,030                          |
| Камено дно (или природни токови) | 0,035                          |
| <b>Вештачки оивичен канал</b>    |                                |
| Месинг                           | 0,011                          |
| Челични глатки                   | 0,012                          |
| Челични офарбан                  | 0,014                          |
| Челични спојен заковицама        | 0,015                          |
| Ливено гвожђе                    | 0,013                          |
| Бетон, добро обрађен             | 0,012                          |
| Бетонски, необрађени             | 0,014                          |
| Обрађено дрво                    | 0,012                          |
| Глачане плочице                  | 0,014                          |
| Цигла                            | 0,015                          |
| Асфалт                           | 0,016                          |
| Профилисани метали               | 0,022                          |
| Зидани од шљунка                 | 0,025                          |

Код великих хидроелектрана и код неких малих, посебно оних које се налазе у широким долинама, где се каналима морају транспортовати велике количине воде, канали су конструисани на начин који је приказан на слици 3.42. Према овом профилу, ископано тло се користи за изградњу насипа, не само до пројектоване висине, већ и да обезбеди додатну висину насипа тако да насип може да прими додатну количину воде (да не дође до изливања), које може да се јави при наглом затварању турбинског затварача или при обилним олујним падавинама. Ове насипне канале, иако лаке за израду је тешко одржавати због ерозије зидова и раста биљака у води. Пре коначне одлуке о рути канала, геолог треба пажљиво да проучи геологију терена.



Слика 3.42. Земљани канал

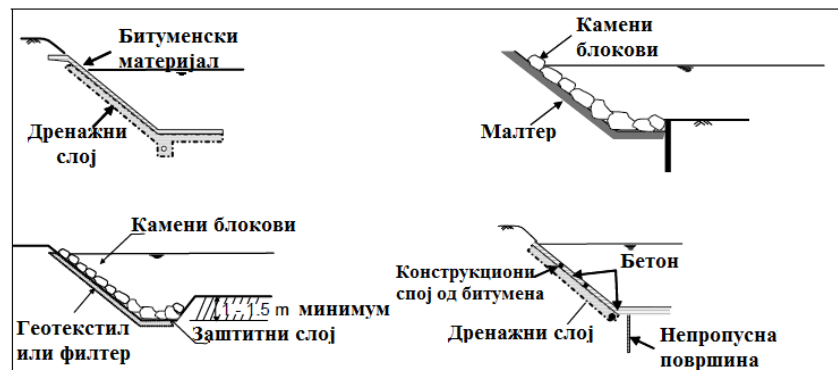


Слика 3.43. Правоугаони бетонски канал

Стабилност зидова је дефинисана од евентуалног спирања материјала. Ова спирања се могу побољшати брзим променама нивоа воде у каналу. Брзину воде у каналима треба држати изнад минималне вредности како би се спречило таложење и раст водених биљака, али испод максималне вредности за спречавање ерозије. Ако је канал необложен, максимална брзина, да би се спречила ерозија, зависи од средњег пречника зрна насипног материјала  $d_m$ :

$$v \leq 5,7 \cdot d_m^{1/3} \cdot R_h^{1/6} \quad (3.6)$$

где је  $R_h$  - хидраулични радијус канала. За зрно пречника од 1mm и хидраулични радијус од 1 до 3 m, критичне брзине су од 0,6 до 0,7 m/s. За зрно пречника 10 mm, критичне брзине су од 1,2 до 1,5 m/s, за исти хидраулични радијус. Горња једначина може да се користи за зрна пречника већег од 0,1 mm. Канали обложени бетоном могу имати брзину воде до 10 m/s. Чак и ако вода садржи песак, шљунак или камење, брзине до 4 m/s су прихватљиве. С друге стране, да би задржали муљ у суспензији након захвата, брзина струјања треба да буде мања од 0,3 - 0,5 m/s. Да би се спречио раст биљака у води, минималне брзине су 0,5 - 0,75 m/s и минимална дубина воде 1,5 до 2,0 m. Одговарајућа облога обезбеђује добру заштиту. Могући материјали који се користе за заштиту су, камени блокови са или без малтера, битуменски материјали или бетони. Неки примери приказани су на слици 3.44. [7].



Слика 3.44. Материјали који се користе за заштиту

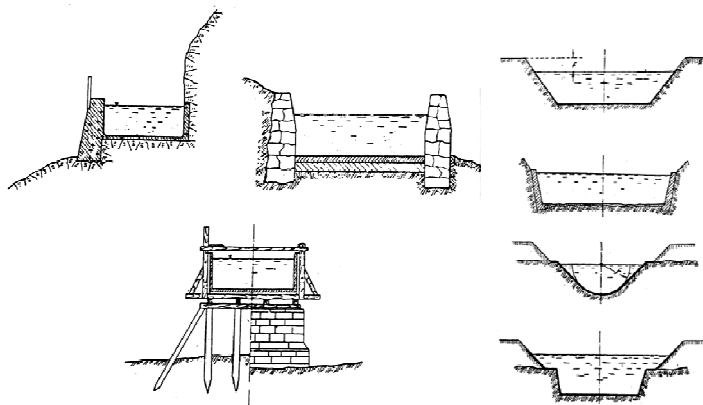
У високим планинским шемама канал је обично изграђен од армираног бетона. На слици 3.43. дат је шематски приказ пресека правоугаоног армирано - бетонског канала. Често се због потребе заштите животне средине захтева да буду покривени обновљеном вегетацијом. Слика 3.45. показује канал који још није покривен бетонском плочом, која ће послужити као основа за нови терен и растиње. Понекад, како би се осигурао канал од цурења и спречио настанак клизишта, који настаје као последица квашења глинених материјала, канали се облажу геотекстилном облогом.



**Слика 3.45.** *Отворени канал [7].*

Током постављања канала, може се наићи на препреке које се морају избећи, па је неопходно да се прелази изнад, око или испод њих. Прелаз потока или котлина захтева да се одреди жлеб (врста продужетка канала) са истим нагибом, подупрет наслагама бетона или челиком, или као мост. У ту сврху челичне цеви су често најбоље решење. Инверзни сифон такође може бити решење проблема, а састоји се од улазне и излазне структуре повезане цевима [7].

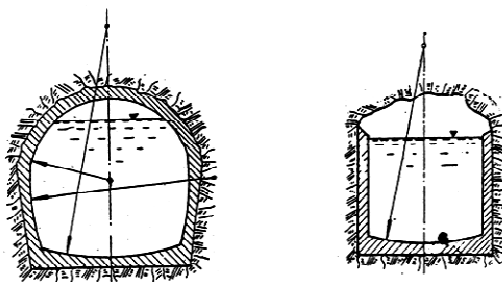
Канали са слободном површином воде могу да се граде као отворени (слика 3.46.) или затворени (слика 3.47.). Отворени канали се праве као обични ровови ископани у терену, а могу бити необложени или обложени, делимично или потпуно.



**Слика 3.46.** *Отворени канали са слободном површином воде*

Отворени канали могу бити израђени од дрвета или бетона, издигнути изнад земље и постављени на дрвеној, каменој гвозденој или армирано-бетонској конструкцији, са разним пресецима канала. Њихова је предност је у томе што имају мању храпавост, а мане су им краћи радни век, мања непропусност воде, услед чега се ове врсте канала примењују само у мањим постројењима.

Затворени канали са слободном површином воде приказани на слици 3.47., граде се као тунели. Примењују се у случајевима када би грађење отвореног канала захтевало изузетно велике земљане радове или када је пожељно скратити дужину канала који треба да обиђе веће узвишење, или када је потребно спречити упадање страних тела у канал. Главни разлог да се један канал изведе као затворен је у томе што су ови канали много сигурнији у експлоатацији, захтевају мање издатака за одржавање при сразмерно мало већим инвестиционим трошковима.

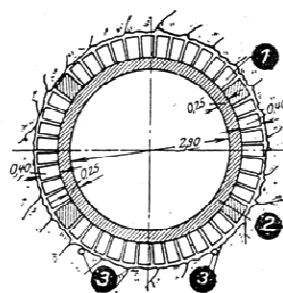


Слика 3.47. Затворени канали са слободном површином воде

Облик пресека канала се усваја на основу материјала у коме је канал ископан. Хидраулички најповољнији профил често није и финансијски најисплативији, нарочито ако се канал копа у тврдом земљишту или стени. У том случају бира се профил који захтева најмање радова [1].

### 3.6.2. Тунели и цевоводи (цеви) под притиском

Тунели под притиском се праве од кружног попречног пресека и облогом чија дебљина зависи од својства земљишта, спољашњих сила и унутрашњег притиска воде у тунелу (слика 3.48). Циљ облагања је повећање непропоустљивости, ојачање зидова и смањивање отпора трења. Необложени тунели се примењују за мање протоке и веома погодне стене.



Слика 3.48. Доводни тунел: 1- изливени бетонски блокови, 2 - армирани бетон, 3 - цеви за одводњавање.

Цеви под притиском (цевоводи), као на слици 3.49., израђују се од дрвета, бетона, армираног бетона, челика, етернита, итд. Избор материјала зависи од притиска коме ће цеви бити изложене, затим од могућности израде на лицу места, од тешкоћа при монтирању и транспорту, до тога да ли се предвиђа накнадно проширивање постројења. Цеви од ливеног гвожђа се мање примењују због прскања при хидрауличним ударима. Дрвене цеви праве се од глатко струганих дасака које се по дужини спајају помоћу пера и жлеба. Споља се ове цеви затежу гвозденим обручима (уз помоћ завртњева) или омотаном гвозденим жицом. За мање инсталације довољан је и катранисани конопац. Готова цев се премазује катраном споља и изнутра ради спречавања труљења.



Слика 3.49. Цевовод

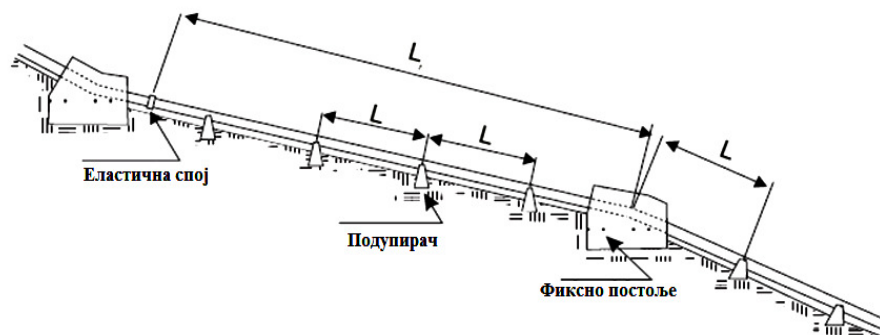
Брзина кретања воде у цевоводу најчешће се креће у границама 1 до 3 m/s у зависности од нагиба цеви. Избор брзине у цеви је од велике важности јер се мора имати у виду да је цев с једне стране јефтинија уколико је мањег пречника (односно при већој брзини), а са друге стране губици енергије утрошене на савлађивање трења нагло расту са повећањем брзине [1].

#### **3.6.2.1. Начин и избор материјала за цевовод под притиском**

Преношење воде од захвата до машинске зграде (што је задатак цевовода под притиском) може изгледати као лак задатак. Међутим одлука о најјекономичнијем начину извођења цевовода под притиском и није тако једноставна. Цевовод под притиском се може извести испод или изнад земље, у зависности од фактора као што су природа самог терена, материјал цевовода под притиском, температура околине и захтеви у погледу заштите животне средине.

PVC цевоводи, који су флексибилни и малог пречника, се на пример могу положити на земљу након постављања подлоге од песка и шљунка око цеви, да би се обезбедила добра изолација. Мале цеви постављене на овај начин не треба осигуравати непомичним блоковима и еластичним спојницама. Већи цевоводи под притиском су обично укопани, онолико дубоко колико је само потребно минимално ископавање стене. Укопани цевовод под притиском мора бити пажљиво офарбан и обложен заштитом од спољашњих утицаја и корозије, али под условом да заштитни слој није

оштећен приликом наношења, како би даља одржавања била минимална. У погледу заштите животне средине тражи се оптимално решење, јер је потребно терен вратити у првобитно стање, а да цевовод не представља препреку у кретању дивљих животиња. Цевовод под притиском постављен изнад земље може бити пројектован са или без дилатационих спојница. Варијације у температури су нарочито важне ако турбина не ради континуално, или када је притисни цевовод припремљен за ремонт, што доводи до ширења или скупљања. Обично је пројектован као права или скоро права линија, са бетонским непомичним блоковима на свакој кривини и са еластичним спојем између сваког непомичног блока. Непомични блокови морају се одупрети оптерећењу које ствара цевовод под притиском и силама трења услед експанзије и скупљања, па ако је то могуће треба да буду постављене на стени. Уколико, због природе терена, непомични блокови захтевају велике количине бетона, поставши тако веома скупи, алтернативно решење је да се уклони сваки други непомични блок и све дилатационе спојнице оставе слободне да се у кривинама померају унапред. У овом случају је пожељно да се поставе праве деонице цевовода под притиском у челичним постољима, направљеним да одговарају контури цеви (слика 3.50).



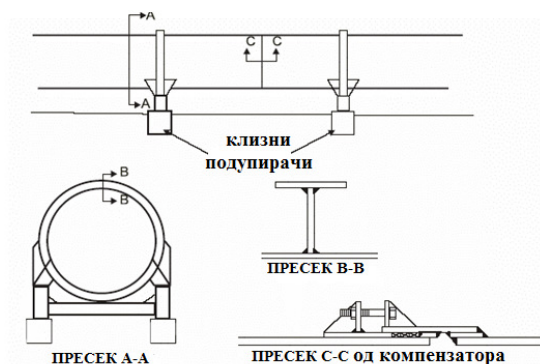
Слика 3.50. Цевовод под притиском

Постоља могу бити израђена од челичних плоча и облика, са графитним и азбестним лимом у паковању, постављеним између постоља и цеви да би се смањила сила трења. Померање се може остварити са дилатационим спојницама, или пројектовањем цеви са кривинама слободног пролаза. Фиксна постоља могу бити међусобно удаљена и до 200 m, а клизни подупирачи се обично постављају на растојањима од 8 до 10 m. Кроз зид машинске зграде цев пролази слободно, јер не сме на њега да се наслони да га не би оштетила приликом истезања.

Данас постоји велики избор материјала за цевовод под притиском. За веће падове и пречнике, се производи заварени челик као најбољи избор. Ипак спирално заварене челичне цеви треба узети у обзир због ниже цене, уколико су доступни у траженим димензијама. За високе падове, челичне и нодуларне гвоздене цеви су предност, али у средњим и ниским падовима челик постаје мање конкурентан, зато што се унутрашња и спољашња заштита од корозије не смањује са дебелином зида и зато што постоји минимална дебелина зида за цеви.

За мање пречнике, постоји избор између челичне цеви, која се добија са прикључком и утичницом гумених „О“ спојева и заптивача, који елиминише теренско заваривање или са завареном прирубницом, навојних парова на лицу места (слика 3.51.) или обичан пренапрегнути бетон; прикључак од нодуларног лива и цеви са заптивачима, цемент - азбеста, стакло-ојачано пластиком (GRP); и PVC или полиетиленске (PE) пластичне цеви. Пластична цев PE 14 је веома повољно решење за средње падове (PVC цев пречника од 0,4 m и може се користити до максималног пада од 200 m), јер често је јефтинија, лакша и лакше се поставља од челичне и није потребна заштита од корозије. PVC 15 цеви се лако постављају због прикључака и утичника спојени са „О“ прстенастом заптивком. PVC цеви су обично постављене под земљом и прекривене минималним слојем од једног метра. Због њихове мале отпорности на UV зрачење не могу се користити на површини ако се не фарбају, обложе или изољују. Минимални полупречник кривине код PVC цеви је релативно велики (100 пута пречник цеви) и његов коефицијент термичког ширења је пет пута већи него за челик. Они су такође веома крти и не одговарају каменом терену.

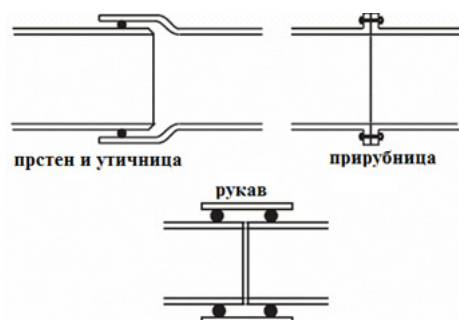
Цеви PE 16 (полиетилен високе молекулске масе) може бити постављен на врху терена и могу да приме кривине од 20 - 40 пута пречника цеви (за оштрије кривине обавезни су посебни фабрички прикључци). PE цев плута на води и може се вући каблом у дугим деоницама, али мора бити састављена на лицу места заваривањем, коришћењем специјалне машине. PE цеви могу да издрже замрзавање без оштећења и нису доступне у пречницима преко 300 mm [7].



**Слика 3.51.** *Цефовод под притиском са бетонским непокретним постолем и компензатором*

Бетонски цефовод се пренапреже помоћу челичних шипки или жице велике чврстоће, са унутрашњом специјалном челичном оплатом која спречава цурење, а за осигурање непропусности спојева користе се специјалне спојнице које морају бити флексибилне како би могле пратити контракцију цеви приликом промене притиска. На жалост, њихова тежина чини транспорт и руковање њима веома тешким, али на њих не утиче корозија.

У мање развијеним земљама, цевовод од дрвених дасака премазаних креозотом и обмотане спиралном жицом или гвозденим обручима (технологија израде бачви) је алтернатива која се може користити за пречнике до 5,5 m и падова до 50 m (може се повећати и до 120 m за пречнике од 1,5 m). Предности укључују прилагодљивост насељеном терену, једноставност постављања на терену са готово никаквом припремом, непотребним услова за еластичне спојеве, бетонске носаче или корозивну заштиту. Цев је састављена од појединачних полуца и челичних потпора или обруча, који омогућавају лако транспортовање и преко тешког терена. Недостаци укључују цурење, нарочито у процесима пуњења или када је потребно да се у цеви задржи вода приликом поправке турбине. У циљу одржавања цев се премазује слојем катрана сваких пет година [11].



Слика 3.52. Начин спајања цеви.[7]

У табели 3.2, дате су неке од особина материјала које се користе за цевовод под притиском. Неке од њих су карактеристични само за посебне вредности Хазен - Вилијамсовог коефицијента, који зависи од стања површине цеви.

Табела 3.2. Карактеристике различитих материјала

| Материјал              | Јонгов модул еластичности $E(N/m^2)E9$ | Коефицијент линеарног ширења $\alpha(m/m\ ^\circ C)E6$ | Крајња затезна чврстоћа $(N/m^2)E6$ | n     |
|------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| Заварена челична       | 206                                    | 12                                                     | 400                                 | 0,012 |
| Полиетиленска          | 0,55                                   | 140                                                    | 5                                   | 0,009 |
| Поливинил хлорид (PVC) | 2,75                                   | 54                                                     | 13                                  | 0,009 |
| Азбестно-цементна      | n.a                                    | 8,1                                                    | n.a                                 | 0,011 |
| Ливено гвожђе          | 78,5                                   | 10                                                     | 140                                 | 0,014 |
| Ковано гвожђе          | 16,7                                   | 11                                                     | 340                                 | 0,013 |

### 3.6.2.2. Хидрауличне карактеристике и структурни захтеви

Карактеристике цевовода под притиском се одликују материјалом, пречником и дебљином зида цеви и врстом споја:

- материјал се одређује у складу са теренским условима, приступачности, тежином, начином спајања и ценом;
- пречник је изабран тако да смањи губитке услед трења унутар притисног цевовода на прихватљиви ниво;
- дебљина зида је одређена да издржи максимални хидраулични притисак, укључујући и притисак код прелазног струјања (хидраулични удар).

Пречник је изабран као резултат односа између трошкова притисног цевовода и губитака снаге. Расположива снага добијена од протока  $Q$  и пада  $H$  дата је једначином:

$$P = QH\rho g\eta \quad (3.7)$$

где је:

$Q$  [m<sup>3</sup>/s] - проток,

$H$  [m] - нето пад,

$g$  [m/s<sup>2</sup>] - убрзање силе земљине теже,

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] - густина воде,

$\eta$  [-] - укупна ефикасност.

Нето пад једнак је бруто паду умањеном за суму свих губитака, укључујући губитке услед трења у цевоводу под притиском, који су приближно пропорционални квадрату брзине воде у цеви. Да остваре одређени проток, цевоводи под притиском мањег пречника, мораће да остваре већу брзину воде од цевовода са већим пречником и због тога ће и губици бити већи. Избор што мањег пречника ће умањити трошкове цевовода под притиском, али повећати губитке енергије и обрнуто. Једноставан критеријум за избор пречника је да ограничи губитак енергије до одређеног процента. Губитак енергије од 4% је обично прихватљив. При строжијем приступу треба изабрати неколико могућих пречника. Вредност енергетских губитака током периода рада постројења се прорачунава за сваки пречник (слика 3.53.). С друге стране, такође израчунавају и планирају трошкове уградње за сваки пречник цеви. Обе криве се приказују графички, а оптимални пречник је онај који обезбеђује минималне укупне трошкове.

Већ је поменуто да су губици пада притиска у цевима успутни губици и локални губици енергије, при проласку кроз решетку, на улазу у цев, у коленима и проширењима и сужењима, и вентилима.

Успутни губици услед трења рачунају се помоћу израза (2.6), која се применом Манингове једначине за проток (2.30) може трансформисати у:

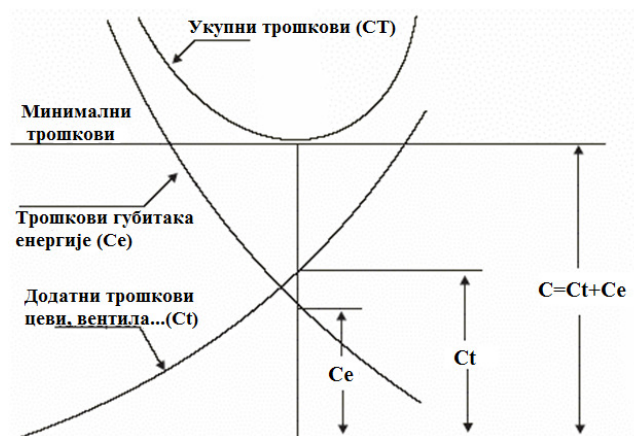
$$\frac{h_f}{L} = 10,3 \frac{n^2 Q^2}{d^{5,333}} \quad (3.8)$$

Анализом претходне једначине, може се видети да двоструко смањење пречника, изазива повећање губитака 40 пута. Из једначине (3.8) следи да је:

$$d = \left( \frac{10,3 \cdot n^2 Q^2 \cdot L}{h_f} \right)^{0,1875} \quad (3.9)$$

Ако се ограничи  $h_f$  на  $4H/100$ , и ако су познати  $Q$ ,  $n$  и  $L$ ,  $d$  се може израчунати једначином:

$$d = 2,69 \left( \frac{n^2 Q^2 L}{H} \right)^{0,1875} \quad (3.10)$$



Слика 3.53. Губитак енергије

Потребна дебљина зида цеви зависи од материјала цеви, његове затезне чврстоће, пречника цеви и радног притиска. Дебљина зида се рачуна по једначини:

$$\delta = \frac{p_1 \cdot d_u}{2\sigma_f} \quad (3.11)$$

где је:

- $e$  [mm] - дебљина зида цеви,
- $p_1$  [kN/mm<sup>2</sup>] - хидростатички притисак,
- $d_u$  [mm] - унутрашњи пречник цеви,
- $\sigma_f$  [kN/mm<sup>2</sup>] - дозвољена затезна чврстоћа.

Код челичних цеви једначина (3.11) има облик:

$$\delta = \frac{p_1 \cdot d_u}{2\sigma_f \cdot k_f} + e_s \quad (3.12)$$

где је:

$e_s$  - додатна дебљина због корозије,

$k_f$  - ефикасност вара:

$k_f = 1$  за бешавну цев,

$k_f = 0,9$  код рендгенски проверених заварених спојева,

$k_f = 1,0$  за рендгенски проверене заварене спојева и ненапрегнуте,

$\sigma_f$  - затезна чврстоћа ( $1400 \text{ kN/mm}^2$ ).

Код цевовода са високим падовима може бити погодно да се користи цевовод са константим унутрашњим пречником, који има различите дебљине по деоницама у функцији хидростатичког притиска.

### 3.6.2.3. Носачи, клизни подупирач и компензатори

Носачи су конструисани тако да издрже тежину цевовода под притиском пуног воде, али не и да се одупру значајним променама уздужних сила. Вертикална компонента мора издржати тежину у [kN], а има вредност:

$$F_1 = (W_p + W_w) \cdot L \cdot \cos \varphi \quad (3.13)$$

где је:

$W_p$  [kN/m] - тежина по метру цеви,

$W_w$  [kN/m] - тежина воде по метру цеви,

$L$  [m] - дужина цеви од тачке средишта за сваки распон,

$\varphi$  - угао цеви са хоризонталом.

Израда потпорних прстенова заснива се на теорији еластичности танких шелни. Зид цеви је изложен напрезањима и оптерећењима која се преносе на подупираче. Уколико се цевовод под притиском подупире у одређеном броју тачака, момент савијања у било ком тренутку цевовода под притиском може се израчунати уз претпоставку да је то континуална греда. Прстенови су заварени за цеви са два пуна вара, заједно са мембранском плочама. Растојање између подупирача  $L$  је одређено вредношћу максималног дозвољеног скретања  $L/65000$ . Максимална дужина између ослонаца дата је једначином:

$$L = 182,61 \cdot \sqrt[3]{\frac{(d_u + 0,0147)^4 - d_u^4}{P}}, \quad (3.14)$$

где је:  $P$  [kg/m] - тежина цеви напуњена водом.

### 3.6.3. Водостан

У случајевима када се цевовод под притиском поставља директно на крај тунела, при наглим променама оптерећења на хидроелектрани, код отварања или затварања протока настаје пораст или пад притиска. Ова појава се назива хидраулични удар и веома је опасна, јер може довести до хаварија на целокупној инсталацији. У ту сврху се на крају тунела, а на месту споја тунела са притисним цевоводом поставља специјална хидротехничка грађевина - водостан, која има улогу да пораст притиска који настаје наглим затварањем турбине ограничи на релативно ниску вредност. Талас повећаног притиска у цевоводу, који настаје услед воденог удара, одбија се од слободне површине у водној комори, која зауставља његово ширење у тунелу. У цевоводу престаје кретање воде, али због инерције ће се у тунелу наставити, што изазива подизање нивоа воде у водној комори. Овај пораст нивоа ће се задржати све док се не заустави кретање воде у тунелу. Ова појава је детаљно описана у поглављу 2. На слици 3.54. је приказана шема хидроелектране са водостаном [10].



Слика 3.54. Систем са водостаном

Водостан се израђује са слободном површином (у додиру са атмосферским притиском), затворени, водостан са пригушивачем, водостан са коморама, а њихова улога је да:

- смање осцилације притиска код хидрауличног удара, скраћују дужину цеви у којој настају промене притиска и уједно ограничавају дејство хидрауличног удара на део цеви од турбине до водостана;
- побољшавају регулационе карактеристике турбине, на тај начин што примају вишак воде код смањења оптерећења турбине, а услед наглог повећања оптерећења (у почетном тренутку), обезбеђују воду.

Постоји више типова геометријских облика водних комора. На избор типа и облика коморе, осим хидрауличких и погонских карактеристика, утичу и топографске, геолошке, хидрогеолошке и хидротехничке особине одабране локације. Јасно је да се, код избора типа коморе морају узети у обзир и трошкови изградње, положај тунела и цевовода и затварача на почетку притисног цевовода, али и чињеница да је водостан најпоузданије решење заштите од хидрауличног удара.

### 3.7. Затварачи и вентили

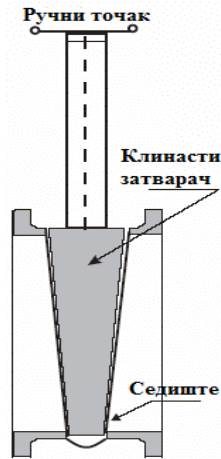
У свакој малој хидроелектрани потребно је омогућити да се нека компонента, због одржавања или поправке привремено изолује. Неки од затварача и вентила одговарају захватима за мале хидроелектране чији системи обухватају следеће:

- прекидаче протока направљени од хоризонтално постављених греда;
- клизне капије од ливеног гвожђа, челика, пластике или дрвета;
- ламелне капије са или без противтега;
- кугласти, ротациони, чаурасти - тип, лептирасти и сферни вентил.

Скоро без изузетка, захват код кога се вода води у цевовод турбине, ће укључити неку врсту контролног затварача или вентила као заштита система узводно од турбине и који могу бити затворени да би се онемогућило испуштање воде у канал. Овај затварач мора бити конструисан тако да се може затворити до максималног протока турбине у случају нестанка електричне енергије и требало би да буде у стању да се делимично отвори, под максималним падом, да би се омогућио попуњавање канала.

За нископритисне најједноставнији тип затварача је зауставна преграда; дрвено хоризонтално постављена и причвршћена на крајевима у жлебовима. Прекидач протока не може да контролише ток и користи се само да га заустави. Уколико се захтева да проток буде потпуно заустављен, у случајевима када је потребна поправка низводно, препоручује се коришћење два паралелна сета прекидача. Они морају бити на растојању од око 15 cm и између њих се ставља слој глине.

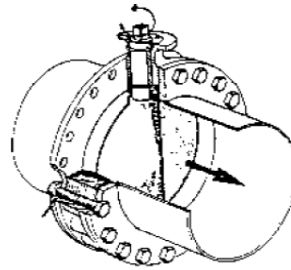
Клизни затварачи се углавном користе за контролу протока кроз отворене канале или друге сличне конструкције ниског притиска. То је врста контроле протока која се користи на преносним структурама захвата, где се уколико је то потребно, проток може потпуно зауставити како би се омогућило одводњавање у цевима. Типови клизних затварача од ливеног гвожђа се углавном користе за отворе мање од два метра квадратна. За веће отворе, конструкције челичних клизних затварача су јефтинији и флексибилнији. Клизни затварачи се ретко користе код цевовода под притиском јер им је потребно више времена за затварање, јер чеп клизи између две вођице унутар затварача. Када се користи у цевоводу високог притиска, притисак воде гура чеп од свог седишта, тако да вентил тешко ради. Овај проблем се превазилази одабиром чепа клинастог облика (слика 3.55.), тако да је заптивач преломљен преко целог лица, чим се она подигне макар мало. Да би се обезбедила добра заптивеност око клизног затварача се поставља гумени заптивак. Он може бити направљени од природне гуме, стирен - бутадиен и хлорпрен једињења. Путања заптивача се налази паралелно са путањом ваљка.



**Слика 3.55.** Затварач у облику клина

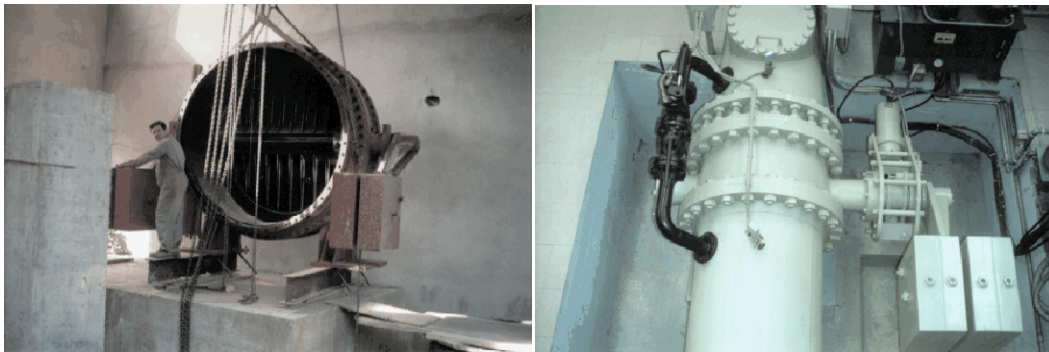
Лептирасти вентил са диском у облику сочива, се поставља на осовину која се окреће и затвара га као на слици 3.56. Притисак који са сваке стране делује на истом месту на диск, омогућава да вентил постаје лак за руковање и брзо се затвара.

Лептирасти вентили се углавном користе као сигурносни вентили за турбине и као регулациони вентил. Да ли је лако разумети да када се користе као регулациони њихова ефикасност је веома мала, зато што у облику диска остаје у протоку и изазива турбуленцију.



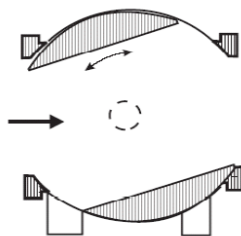
**Слика 3.56.** Лептирасти вентили

Лептирасти вентили су робусни и једноставне конструкције, а могу се управљати ручно или хидраулички. Слика 3.57., показује велики лептирасти вентил који се користи у електрани и лептирасти вентил хидраулички управљан, са помоћним системом отварања и противтеже, на улазу у малу Францисову турбину.



**Слика 3.57.** Велики лептирасти вентил (лево) и лептирасти вентил хидраулички управљан (десно)

Кугласти и ротациони вентили (слика 3.58) имају мање губитке него стандардни клизни и лептирасти вентили и затварачи. Такође се често користе упркос њиховој вишој цени.



**Слика 3.58.** Кугласти и ротационе вентили

Код радијалних затварача, различити су начини формирања покретног преливног врха и омогућавају пажљиву контролу горње и доње воде. На слици 3.59., приказан је сегментни затварач на левој страни, спреман да се инсталира и кућиште на бетонском пристаништу на десној страни. Радијалним затварачима се управља подизањем или спуштањем, што омогућава да вода прође испод плоче затварача. Савијена плоча, која формира узводно лице је концентрична са зглобом на затварачу. Лежајевима су усидрени у луке и преносе хидростатичка оптерећења. Зато што хидростатичко оптерећење пролази кроз лежајеве, силе подизања су сведене на минимум. Губици енергије у затварачима и вентилима су релативно велики, посебно када се користе као регулациони уређаји [7].



**Слика 3.59.** Таинтер капија (лево) и кућиште на бетонском постољу

### 3.8. Разводник воде

Грађевина подигнута на месту где вода прелази из доводног органа у турбински улаз зове се разводник воде. Он служи најпре за пропуштање воде у турбину, а затим и за регулисање нивоа воде тј. пада који се користи у турбини. Разводник је обично шири и дубљи од доводног канала да би се у њему таложио песак и муљ који су прошли кроз доводни канал. Разводници се израђују на више начина и међусобно се разликују према облику, величини, положају и начину дејства.

Две основне групе разводника су:

- разводници са слободном површином воде,
- разводници за доводе под притиском.

Разводници са слободном површином воде се састоје од базена, прелива, уставе за пражњење, преграде за одстрањивање пливајућих тела, зидова за усмеравање воде, турбинске уставе, fine решетке и канала за пражњење. Базен се добија проширивањем и продубљивањем корита доводног канала. У базену разводника се налази бетонирани ров дубине 30 до 40 cm у коме се таложе песак и муљ. Овај ров је обично испред решетке, а спојен је са уставом за пражњење ради повремениг испирања. Прелив треба да је довољно широк да би се сувишна вода могла неометано удаљити из разводника. Ако у близини бране постоје преливи или испусти онда преко прелива у разводнику не прелази сва количина сувишне воде, па прелив на разводнику служи само за fino регулисање нивоа воде. Ово fino регулисање воде омогућава да димензије доводног канала и разводника буду знатно мање.

Разводници за довод под притиском се разликују прилично од претходне групе разводника и овакви разводници се постављају на прелазу из тунела у цевни вод. Саставни део разводника представља посебна водена комора - водостан. Вертикална комора може имати и хоризонталан проширења, ископана на одговарајућој висини изнад тунела. При затварању турбине кретање велике водене масе нагло се прекида. Вода која долази из тунела наставља кретање услед инерције и издиже ниво воде у разделнику улазећи у проширења коморе. Тиме се врши „кочење” воде, која још увек притиче из тунела и ублажавају ударици у цевном воду и тунелу. При отварању турбине водена комора убрзава протицање воде из тунела. Подизање и спуштање нивоа при затварању и отварању цевовода се одиграва тако што се ниво воде извесно време таласа док се не устали.

Значај водених комора је веома велики што је и разумљиво када се има у виду какву би катастрофу изазвао хидраулични удар у цеви, која се већ налази под врло високим притиском, ако се удар не би ублажио коморама водостана (водостан може да се састоји од читавог низа међусобно повезаних галерија). И у овим разделницима се такође налазе ров за хватање песка, отвор за чишћење, фина решетка (наравно у зависности од врсте постројења) [1].

### **3.9. Одводни канал устава за оправке**

Вода која истиче из турбине одлази у речно корито или непосредно, или кроз одводни канал који почиње од сифона турбине. Одводни канал се може изградити као отворен или као затворен канал са слободном површином воде или као тунел. Код постројења са ниским притиском нарочито је важно димензионисање пресека канала да би губици пада који настају у одводном каналу били што мањи, јер постројење користи и онако мали пад. Губитак пада у одводном каналу не може се сасвим избећи јер канал мора

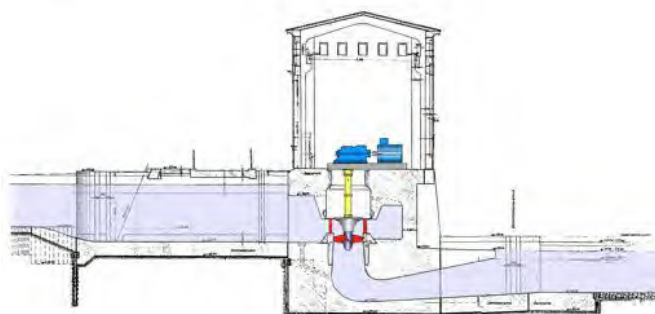
имати извешан нагиб да би вода могла отицати. Ако је одводни канал ископан у земљишту које вода лако односи, после извесног времена може се десити да вода продуби корито канала, те ће ниво воде у њему за време ниског водостаја опасти испод предвиђене границе. Таква појава доводи до продирања ваздуха у сифон услед чега снага турбине нагло опада. При одржавању хидропостројења треба одводном каналу посветити пажњу и благовремено извршити потребне оправке.

Осим турбинске уставе која је постављена испред турбине уставе се постављају и иза турбине. Када су обе уставе спуштене вода се из простора између њих испумпа, па се могу обавити прегледи и евентуалне поправке на турбини, спирали или окну и усисној цеви - сифону. Низводна устава за оправку је обична, једноставна устава дрвене или гвоздене конструкције [1].

### 3.10. Машинска зграда

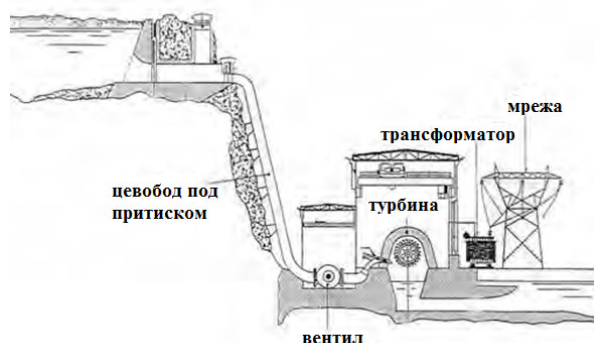
Машинска зграда се поставља при крају речне деонице коју хидропостројење користи. Свако хидропостројење има другачију машинску зграду, јер њен облик зависи од многих чинилаца као што су: врста, број и величина турбинских агрегата, облик околног терена, квалитет земљишта, величина и положај, уређаја за регулисање односно затварање турбине, и др [2].

Као што је означено на сликама 3.60. и 3.61., у машинској згради је следећа опрема: улазни затварач или вентил, турбина, појачавач брзине (ако је потребно), генератор, системи контроле, кондензатор, прекидач, заштитни систем, трансформатори и сл. На слици 3.60. је шематски приказ интегрисаног захвата у машинској згради погодног за мале падове. Под - конструкција је део бране и обезбеђује састав захвата са отпадном решетком у вертикалној оси Капанове турбине, заједно са генератором.



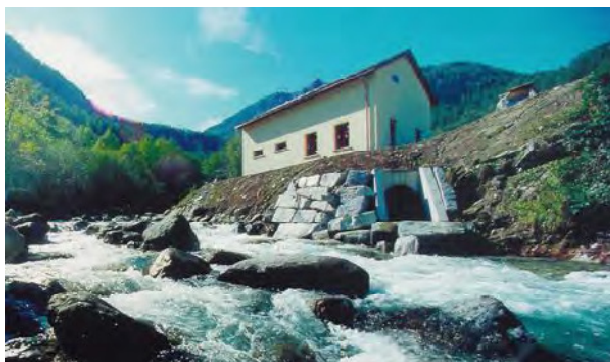
**Слика 3.60.** Шематски приказ једне машинске зграде - ниског пада

У средње и високим шеме падова, машинске зграде су обичне као на слици 3.61., са улазом за цевовод и одводни канал. Иако није уобичајено, ова врста електрана може бити подземна [7].



**Слика 3.61.** Шематски приказ једне машинске зграде високих и средњих падова

Машинска зграда мале хидроелектране се своди практично на само једну просторију са агрегатом. У циљу што веће рационализације постројења, за смештај агрегата се могу користити и већ постојећи адаптирани објекти (зграде напуштених воденица и сл.). Да би се остварила једноставнија машинска зграда бира се положај агрегата у складу са тим. Машинске зграде се решавају по аналогiji са зградама већих електрана, уз максимално поједностављење конструкције, тако да се иста сведе на само једну просторију.



**Слика 3.62.** Преглед типичне машинске зграде

Зграде малих хидроелектрана које се планирају у подручјима природних лепота и туристичке вредности, ваља најприкладније уклопити у средину. Могу се градити у виду планинских кућица, при чему се и сви пратећи садржаји (доводни канал, водне коморе, итд.) прилагођавају конструкцијом и материјалом амбијенту у који се уклапају [3].

Утицај на облик зграде, управо и начин увођења воде у турбину. Према томе како је изведено увођење воде у турбину, све машинске зграде могу се сврстати у три главне групе, које представљају три типска облика зграде:

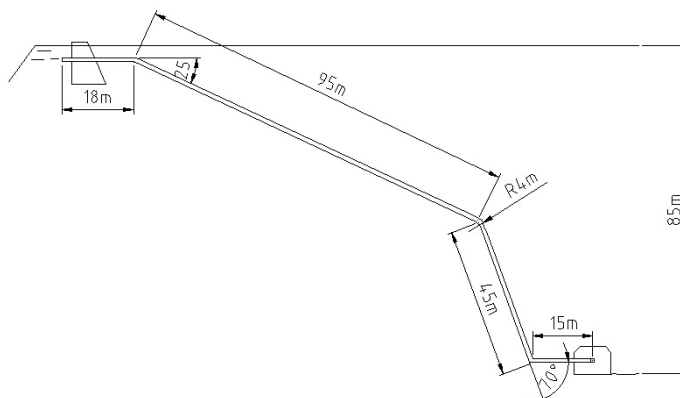
1. Отворени довод у виду окна. Овакав начин довода примењује се за падове до највише 15 m и углавном за мања постројења. Одвођење се може извести и помоћу цеви од лима. Доња вода се налази испод машинске просторије, а може се налазити и са стране зграде, што је повољније.

2. Затворени довод за мање падове. Турбина је са стране окружена водом, а са горње стране налази се машинска просторија. Бетонски фундамент има отворе за улаз и излаз воде и истовремено служи за довођење воде до турбине. Вратило турбине код овог облика је увек вертикално.
3. Затворени довод за веће падове. Овакав довод изводи се у виду цеви. Вода се у поједине турбине уводи кроз цеви које се гранају од главног цевовода.

Из ова три примера види се да висински положај машина може бити веома различит и да углавном зависи од начина на који се вода доводи турбини. Постоља хидрауличних машина су масивна због великих хидрауличних притисака и вибрација при раду. Машинска просторија има облик хале и треба да је довољно висока и довољно широка, тако да пролаз и приступ ка машинама буде сасвим слободан са свих страна (он треба да буде приближно широк колико износи пречник турбине). Под треба да је од керамичких плочица, глатке површине да би се што лакше чистио. У машинској сали не сме бити прашине. Величина машинске просторије зависи од истих услова од којих и облик зграде. Постројења са високим притиском захтевају сразмерно најмању просторију [2].

## 4. Пример прорачуна

Да би се могли представити начини градње једне хидроелектране, њихови објекти, као и утицаји који они имају при реалним условима, у овом раду је представљен пример хидрауличне шеме једне мале хидроелектране. Основни задатак овог прорачуна је искоришћење енергетског потенцијала у виду акумулације, који се налази на дефинисаној локацији (на одређеном нивоу). Како би се савладале теренске прилике и вода довела до машинске зграде, бира се најповољније и најприхватљивије решење, које би омогућило да се утицаји доводних објеката на губитке енергије сведу на минимум тј. на прихватљив ниво од 5%.



Слика 4.1. Шематски приказ постројења

Од постојеће акумулације, вода се притисним цевоводом (челичне цеви) дугим 173 m, доводи до машинске зграде, где се даље користи за покретање турбина. На улазу у захват се налази решетка површине  $5 \text{ m}^2$ , постављене под углом од  $60^\circ$  у односу на хоризонталу. Решетка је од нерђајућег челика, дебљине шипки од 12 mm и растојања између шипки од 70 mm.

Прорачуном је потребно дефинисати пречник цевовода, све губитке (успутне и локалне) као и приказати утицај промене протока на остале губитке и графички представити криву трајања протока. У поставци прорачуна дефинисани су полазни параметри најпре: бруто пад од 85 m и потребан максимални проток од  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ , као и геометрија терена.

### 4.1. Прорачун губитака

У прорачуну је усвојено да се проток креће од минималних  $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$  до  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  колико је максимални дозвољени проток кроз цевовод.

На основу претходног, полазни подаци за прорачун притисног цевовода су:

Називни проток :  $Q = 0,15, 0,25 \dots 3 \text{ m}^3/\text{s}$

Бруто пад или висинска разлика је:  $H_b = 85 \text{ m}$

Укупна дужина цевовода:  $L = 173 \text{ m}$

Густина воде:  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

## Прорачун<sup>1</sup>

Уколико су нам познати подаци за максимални проток  $Q_{max}$  и дужина цевовода  $L$ , можемо дефинисати пречник цевовода коришћењем једначине (3.9):

$$d = 2,69 \left( \frac{n^2 Q_{max}^2 L}{H_b} \right)^{0,1875} = 0,884 \text{ [m]}$$

Коефицијент  $n$  се усваја на основу карактеристике материјала, а у овом прорачуну за челични цевовод је:  $n = 0,012$ . На основу усвојеног коефицијента и познатих полазних података, добијени пречник цевовода је 0,884 m. За пречник цевовода је потребно усвојити стандардну вредност, која ће се даље користити у прорачуну:  $d = 1 \text{ m}$ .

Површина проточног пресека цевовода за стандардни пречник  $d = 1 \text{ m}$ , се добија једначином:

$$A_c = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = 0,785 \text{ [m}^2\text{]}$$

Брзина воде у цевоводу варира у зависности од протока и може се изразити као:

$$v(Q) = \frac{Q}{A_c} \text{ [m/s]}$$

За усвојени опсег протока, брзине струјања воде у цевоводу крећу се од 0,191 m/s за минимални проток до 3,756 m/s за максимални проток.

На основу добијених вредности брзина и кинематске вискозности, рачуна се Рејнолдсов број ( $Re$ ), који ће такође бити у функцији од протока. Пошто је радни флуид вода, можемо усвојити вредност кинематске вискозности, која за воду износи  $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . На основу добијених брзина струјања, стандардног пречника цевовода и вискозности могу се израчунати Рејнолдсов број, по једначини (2.4):

$$Re(Q) = \frac{d \cdot v(Q)}{\nu}$$

За усвојене протоке, добијамо  $Re$  број, који има вредности од  $1,91 \cdot 10^5$  до  $3,76 \cdot 10^6$ , из којих се види да је струјање турбулентно.

<sup>1</sup>Комплетан прорачун за поменути пример дат је у Прилогу 1.

Теоријски максимални притисак у цевоводу можемо дефинисати као:

$$p_{max} = H_b \cdot \rho \cdot g = 8,338 \cdot 10^5 \text{ [Pa]}$$

#### 4.1.1. Прорачун успутних губитака

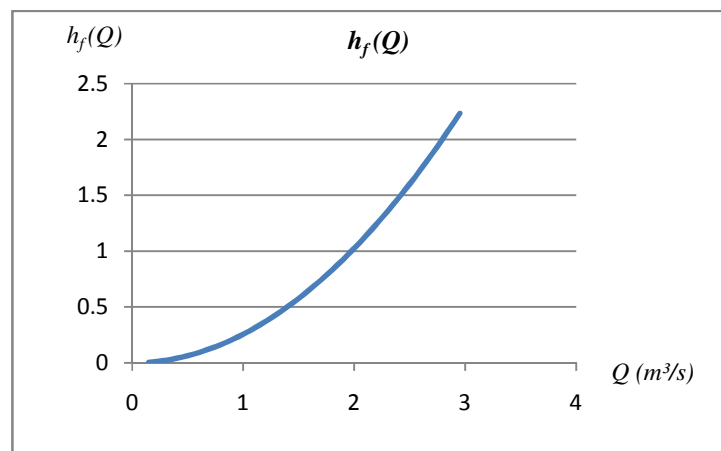
Губитке који настају на праволинијском делу пута, (губитке услед трења), можемо одредити дефинисањем коефицијент отпора  $\lambda$ , који за добијени режим струјања (добијене Рејнолдсове бројеве у зависности од протока) зависи од релативне хравости  $\epsilon$ , помоћу обрасца (2.10) или коришћењем Манингове једначине (3.7). У овом примеру прорачун губитака услед трења на праволинијском делу пута, извршен је преко Манингове формуле:

$$\frac{h_f}{L} = 10,3 \frac{n^2 Q^2}{d^{5,333}}$$

из које добијамо израз за  $h_f$  у функцији од протока:

$$h_f(Q) = \left( \frac{10,3 \cdot n^2 \cdot Q^2}{d^{5,333}} \right) \cdot L$$

Губици услед трења на правој деоници, добијени коришћењем претходне формуле приказани су на дијаграму 4.1:



Дијаграм 4.1. Промена губитака услед трења у зависности од промене протока.

### 4.1.2. Прорачун локалних губитака

#### 1) Губици на решетки

Како је у поставци наглашено на улазу у захват се налази решетка:

површине:  $A_r = 5 \text{ [m}^2\text{]}$

пречника шипке:  $t = 12 \text{ [mm]}$

и растојањем између шипки:  $b = 70 \text{ [mm]}$

Решетка је постављена под углом од  $\varphi = 60^\circ$  у односу на хоризонталну воду.

Брзина воде испред решетки, која зависи од протока се рачуна једначином (3.2):

$$v_0(Q) = \frac{Q}{K_1} \cdot \left(\frac{b+t}{b}\right) \cdot \left(\frac{1}{A_r}\right) \left(\frac{1}{\sin \varphi}\right) \text{ [m/s]}$$

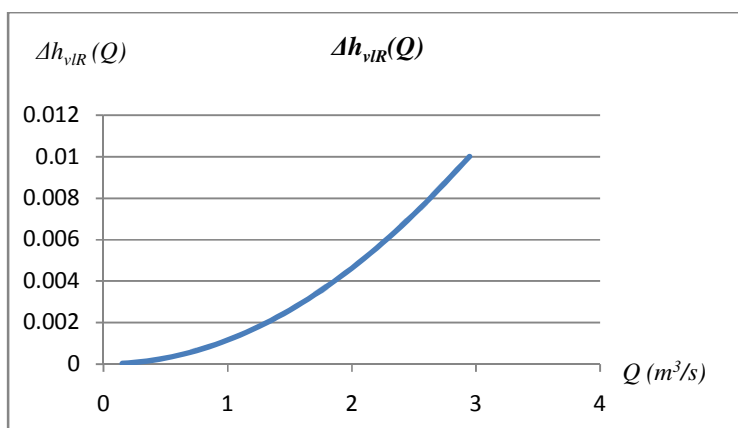
Где је:  $K_1 = 0,8$  - коефицијент, а усвојена вредност коефицијента дефинисана ја за аутоматску грабуљу са диференцијалним сензором притиска. Добијене брзине струјања  $v_0$  испред решетки крећу се од 0,051 до 0,998 m/s.

За израчунавање губитака у решетки потребно је одредити коефицијент  $K_t$ , који зависи од облика шипке и усвојена је вредност:  $K_t = 2,4$ .

За одређивање вредности губитака на решетки, која зависи од протока, користимо Кирхмерову једначину (2.18):

$$\Delta h_{vIR}(Q) = K_t \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^{4/3} \cdot \left(\frac{v_0(Q)^2}{2g}\right) \sin \varphi \text{ [m]}$$

Губици добијени коришћењем претходне формуле, приказани су дијаграму испод:

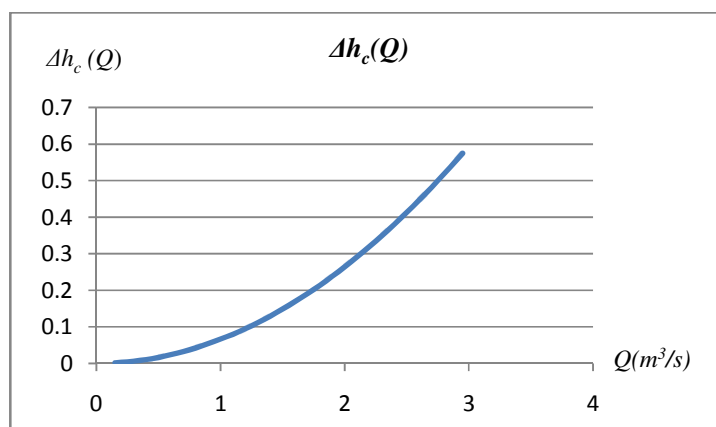


Дијаграм 4.2. Промена губитака на решетки у зависности од промене протока.

## 2) Губитак услед наглог проширења или сужења

За прорачу улазних губитака споја резервоара и цеви, што је случај наглог сужења користи се коефицијент  $K_e$ , за који је на основу слике 2.18, усвојена вредност:  $K_e=0,8$ . Израчунавање губитка у споју резервоара и цеви, који зависи од протока (представљен на дијаграму 4.3.), врши се једначином (2.20):

$$\Delta h_c(Q) = K_e \cdot \frac{v(Q)^2}{2 \cdot g} \text{ [m]}$$

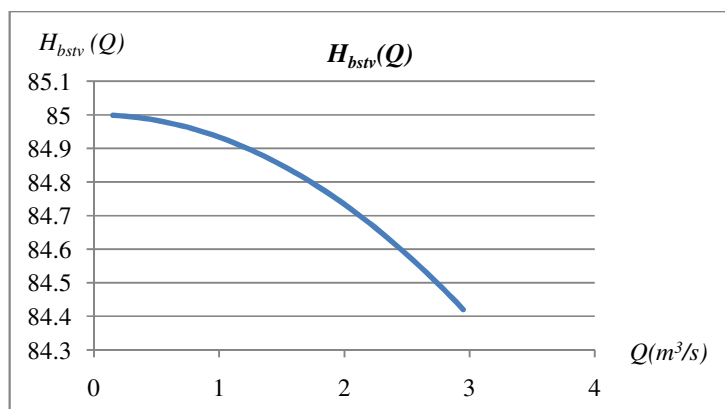


Дијаграм 4.3. Промена губитака на споју резервоара и цеви у зависности од промене протока

Бруто пад на почетку цевовода под притиском умањен за губитке на улазу у цевовод (губици на решетки и на улазу у цевовод) се добијају:

$$H_{bstv}(Q) = H_b - \Delta h_c(Q) - \Delta h_{vlR}(Q) \text{ [m]}$$

и има вредности које су дате на дијаграму 4.4.



Дијаграм 4.4. Промена бруто пада умањеног за губитке на улазу у зависности од промене протока.

### 3) Губици у кривинама

Поставком прорачуна дефинисан је радијус кривине, који је дат као:  $R = 4 \text{ m}$ .

Да би се одредио коефицијент локалног отпора који се јавља у кривинама неопходно је дефинисати однос радијуса кривине и пречника цеви као:  $R/d = 4$ , при чему се из табеле 2.6. за сваку кривину посебно усваја коефицијент  $K_b$ .

Коефицијент локалног отпора за три кривине који се усваја таблично износи:

$$K_{b1} = 0,05;$$

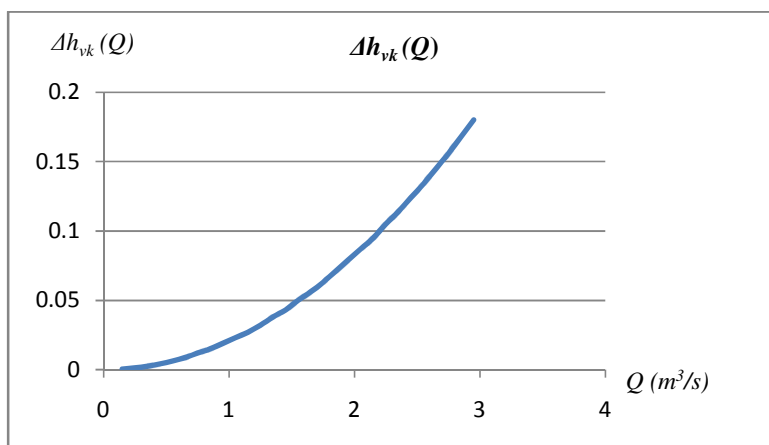
$$K_{b2} = 0,08;$$

$$K_{b3} = 0,12;$$

па се губитак у кривинама, који зависи од протока, рачуна једначином:

$$\Delta h_{vk}(Q) = (K_{b1} + K_{b2} + K_{b3}) \cdot \frac{v(Q)^2}{2 \cdot g}, [\text{m}]$$

Губици у кривинама, добијени коришћењем претходне формуле приказани су дијаграму испод:



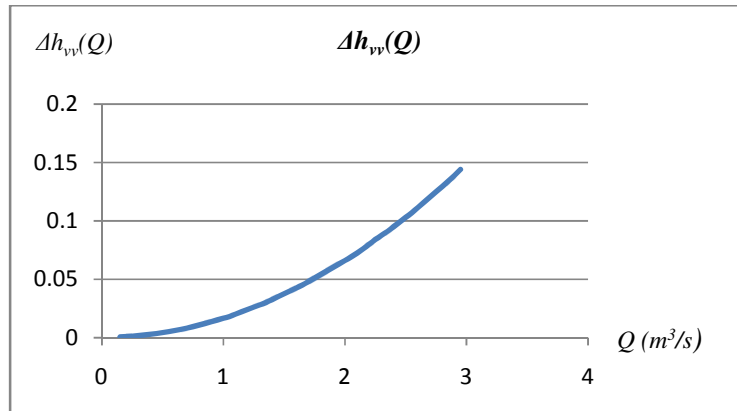
**Дијаграм 4.5.** Промена губитака у кривинама у зависности од промене протока.

### 4) Губици у вентилима

Губици у вентилима и затварачима зависе од типа вентила, одакле се за одређени тип усваја вредност коефицијент локалног отпора. За табласти затварач према слици 2.19., вредност коефицијента је  $K_v = 0,2$ . Губитак у затварачу, који зависи од протока дат једначином:

$$\Delta h_{vv}(Q) = K_v \cdot \frac{v(Q)^2}{2 \cdot g} [\text{m}]$$

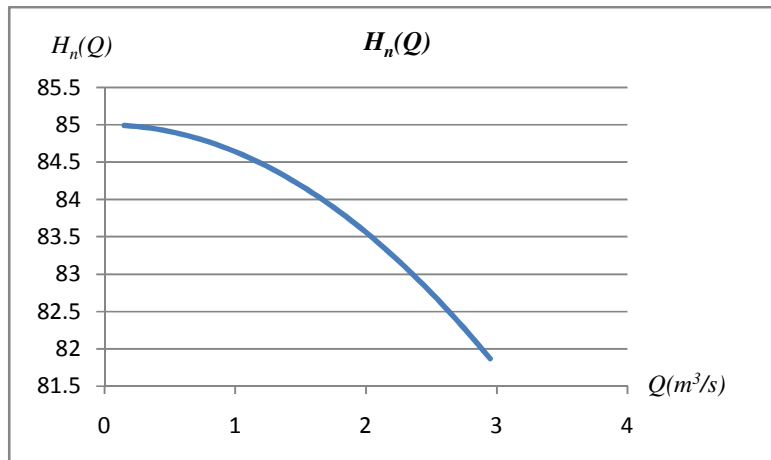
Губици у вентилима, добијени коришћењем претходне формуле приказани су дијаграму испод:



**Дијаграм 4.6.** Промена губитака на затварачу у зависности од промене протока.

После прорачуна, који се односи на губитке (успутне и локалне), одређује се нето пад, који такође зависи од протока. Нето пад се добија умањењем бруто пада за вредност прорачунатих губитака следећом једначином:

$$H_n(Q) = H_b - h_f(Q) - \Delta h_{vlR}(Q) - \Delta h_c(Q) - \Delta h_{vv}(Q) - \Delta h_{vk}(Q) \text{ [m]}$$



**Дијаграм 4.7.** Промена нето напора у зависности од промене протока.

Укупан губитак енергије добијен овим прорачуном је мањи од 4%, што је и био услов за проверу тачности прорачуна, јер се овај губитак сматра прихватљивим.

## 5. Утицај изградње и коришћења мале хидроелектране на животну средину

У исто време када треба прихватити чињеницу да производња струје из малих хидропостројења не узрокује емисију угљен диоксида или течних загађивача, стоји чињеница да због лоцирања у осетљивим подручјима локални утицаји нису увек занемарљиви. Мале хидроелектране, чији је ефекат на животну средину врло мали и чије се дозволе за изградњу разматрају на нижим административним нивоима, трпе већи притисак група - риболовачких удружења, еколога и др. Идентификовати утицаје није тешко, али није ни једноставно одлучити које мере треба предузети, па се с тим у вези препоручује успостављање дијалога са надлежнима за заштиту животне средине, као први корак у фази осмишљавања пројекта мале хидроелектране.

Утицаји малих хидроелектрана на животну средину зависе од места уградње и примене технологије. Већа је вероватноћа да ће планинска постројења са високим падовима, лоцирана у крајње еколошко осетљивим подручјима, имати негативнији утицај на животну средину од оних са ниским падом и постројењима интегрисаним у брани. Унапређење и ширење постојећих малих хидроелектрана, генерише другачији утицај у односу на изградњу потпуно нове локације. Негативни утицаји на животну средину настају и у току изградње и у току коришћења, а у табелама 5.1 и 5.2 дат је опис могућих утицаја, на основу Европских студија који се баве спољашњим факторима и проценама утицаја на животну средину, од стране групе експерата.

**Табела 5.1. Утицај у току изградње.**

| Догађаји током изградње                | Утицај на ствари и живи свет          | Утицаји                              | Приоритети |
|----------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------|
| Геолошка премеравања                   | Дивљи свет                            | Бука                                 | Низак      |
| Сечење постојеће вегетације            | Шумарство                             | Промена средине                      | Средњи     |
| Проширивање постојећих путева          | Општа јавност                         | Стварање могућности, промена средине | Средњи     |
| Премештање земље                       | Геологија терена                      | Постојаност нагиба                   | Низак      |
| Копање тунела                          | Хидро-геологија терена                | Промена тока реке                    | Низак      |
| Стално насипање материјала на нагибима | Геологија терена                      | Постојаност нагиба                   | Низак      |
| Реализовање насипа                     | Водени свет, хидро-морфологија терена | Измене речне хидраулике              | Средњи     |
| Стварање привремених гомила земље      | Геологија терена                      | Постојаност нагиба                   | Низак      |

|                                                        |                           |                                            |        |
|--------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------|--------|
| Привремена селидба људи, путева, електричних водова    | Општа јавност             | Занемарљив                                 |        |
| Реализација путева и покроба за градилиште             | Дивљи свет, општа јавност | Јак визуелни ефекат, ремећење дивљег света | Низак  |
| Дренажа земљишта                                       | Водени екосистем          | Промена средине                            | Средњи |
| Привремено одвраћање реке                              | Водени екосистем          | Промена средине                            | Висок  |
| Коришћење багера, камиона, хеликоптера, кола за особље | Дивљи свет, општа јавност | Бука                                       | Висок  |
| Присуство људи у току радова на градилишту             | Дивљи свет, општа јавност | Бука                                       | Низак  |

**Табела 5.2. Утицаји током функционисања.**

| Догађаји током функционисања           | Утицај на ствари и живи свет    | Утицај                                    | Приоритети |
|----------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|------------|
| Производња обновљиве енергије          | Општа јавност                   | Редукција материјала које загађују        | Висок      |
| Постављање бране на водотоку           | Водени екосистем                | Модификовање средине                      | Висок      |
| Стални радови у кориту реке            | Водени екосистем                | Модификовање средине                      | Висок      |
| Одвраћање водотока                     | Водени екосистем                | Модификовање средине                      | Висок      |
| Цевовод                                | Дивљи свет                      | Јак визуелни ефекат                       | Средњи     |
| Нове електричне линије                 | Општа јавност, дивљи свет       | Јак визуелни ефекат                       | Низак      |
| Спречавање одрона обале бетонирањем    | Водени екосистем, општа јавност | Модификовање средине, Јак визуелни ефекат | Низак      |
| Обалски насип                          | Водени екосистем, општа јавност | Модификовање средине, Јак визуелни ефекат | Низак      |
| Измена водног тока                     | Рибе                            | Модификовање средине                      | Висок      |
| Централе                               | Модификовање средине            | Средњи                                    |            |
| Општа јавност                          |                                 | Модификација рекреативних активности      |            |
| Бука од електро-механичке опреме       | Општа јавност                   | Промена квалитета живота                  | Низак      |
| Уклањање материјала из корита водотока | Водени свет, општа јавност      | Унапређење квалитета воде                 | Висок      |

## 5.1. Утицаји током изградње

Постројења различитог типа (деривацијског типа, са вишефункционалним акумулацијама, убачени у канале за наводњавање или уграђени у систем за снабдевање водом итд.), изазивају веома различите утицаје, како са квантитативног тако и са квалитативног становишта. Постројења која користе вишенаменске бране практично немају штетне утицаје, с обзиром да је јасно да када је насип изграђен све потребне мере за смањење утицаја су већ уведене. Чак ће и локација машинске зграде бити у основи бране и без утицаја на екосистем. Постројења интегрисана у канале за водоснабдевање или системе за наводњавање неће произвести нове утицаје у односу на оне већ присутне од тренутка изградње канала и цевовода. Са друге стране, за постројења деривацијског типа потребно је вршити посебне анализе утицаја.

### 5.1.1. Резервоари

Утицаји настали изградњом брана, насипа и пратећих акумулација укључују, уз губитак земљишта, изградњу и отварање путева, радних платформи, ископавање, минирање и чак у зависности од величине бране и изградњу постројења за производњу бетона. Остали утицаји који се не могу занемарити су ефекат баријера и скретање тока који настаје као последица регулисања речног тока који раније није постојао. Мора се нагласити да акумулације у ствари нису карактеристични за мале хидроелектране. Већина малих хидроелектрана спада у проточне, које немају велике бране.

### 5.1.2. Водозахвати, отворени канали, цевоводи, одводни канали

Утицаји настали изградњом ових структура описани су у табели 5.1., - утицај буке на животиње, опасност од ерозија због смањења вегетације приликом ископавања, замућености воде и избацивање талоба на доњим токовима. Да би се смањили поменути утицаји, пожељно је грађевинске радове везане за ископавања обављати у сезони ниских водостаја, а ископану земљу је потребно што пре вратити. У сваком случају, ови ефекти су увек краткотрајни и пролазни и не изазивају озбиљне потешкоће за административне процедуре одобравања изградње пројекта. Препоручљиво је обнављање и ојачавање вегетације на обалама река која је била угрожена током фазе изградње хидрауличних структура, да би се спречила ерозија речног корита. Потребно је нагласити да је земљиште неопходно поново настанити домаћим врстама, које су најбоље прилагођене локалним условима [1].

Имајући у виду дугорочни карактер биолошких радова на заштити од ерозије, неопходно је да се са овим радовима почне благовремено. Другим речима, када се неки просторни комплекс, кроз планска документа, резервише за потребе формирања акумулације, потребно је одмах започети са извођењем техничких и биолошких мера заштите од ерозије. Синхронизовање активности на изградњи водопривредних објеката и антиерозионом уређењу је неопходно, јер биолошке мере заштите од ерозије (пре

свега пошумљавање), захтевају доста времена да би се манифестовао њихов ефекат. Најефикасније и најрационалније решење антиерозионог уређаја једног подручја састоји се у оптималној комбинацији биолошких, биотехничких и техничких мера и радова [6].

Студија процене утицаја мора узети у обзир и ефекте расипања ископаног тла у токовима и штетне последице живота радника на обично ненасељеним подручјима током извођења радова. Овај утицај, може бити негативан ако је постројење лоцирано у националном парку. Емисија гасова из возила, прашина од ископавања, висок ниво буке и остале мање значајне препреке доприносе угрожавању животне средине када су постројења лоцирана у осетљивим подручјима. Да би се напред наведени ефекти избегли или ублажили, саобраћајни ток се мора пажљиво планирати да би се елиминисао беспотребни саобраћај и исти свео на минимум. Треба нагласити да се са повећавањем нивоа активности у одређеном подручју, препоручује коришћење локалне радне снаге и малих локалних подизвођача током фазе извођења радова, што је позитивна страна изградње коју треба нагласити при дијалогу са заинтересованим странама из локала.

## **5.2. Утицаји који настају током фазе функционисања постројења**

### **5.2.1. Звучни ефекти**

Дозвољен ниво буке зависи од локалне популације или изолованости домаћинства у близини електрана. Буку производе углавном турбине и у случајевима када се користе, мултипликатори. У садашњим условима бука у електранама се може редуковати, уколико је то неопходно, до нивоа од 70 dB, када је у спољашњим условима скоро не приметна. Редуковање нивоа спољашње буке постиже се употребом вибрационе изолације зидова и крова електране.

Мере које се најчешће спроводе да би се редуковао ниво буке су:

- изолација машинске хале - од суседних просторија употребом двоструких зидова са различитим масама, са слојем стаклене вуне између;
- врата са звучном изолацијом,
- подови обложени слојем стаклене вуне 15 mm дебљине;
- неправилни плафон са карактеристикама за слабљење звука;
- саставци за пригушивање вибрација између отвора за вентилацију;
- ниска брзина струјања ваздуха у водовима (4 m/s);
- улаз и излаз главних одводних цеви опремљених пригушивачима буке;
- ваздушни канали направљени са материјалом у сендвичу (бетон, стаклена вуна, перфориране цигле и гипс).

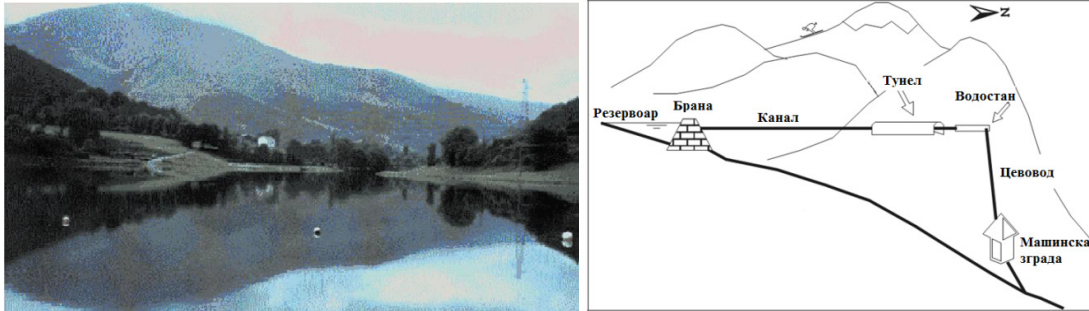
Подземна вентилација има три основне сврхе: смањивање влажности ваздуха у просторији како би се осигурало исправно функционисање и одржавање опреме, доток свежег ваздуха до радника и уклањање топлоте генерисане разним компонентама постројења. Чак и са максималним вредностима циркулације ваздуха процењеним на 7000 m<sup>3</sup>/h брзина струјања ваздуха кроз вентилационе канале не прелази 4 m/s. Треба напоменути да све унапред задате мере смањења нивоа буке захтевају и додатна улагања. Ово се може сматрати прихватљивим решењима, уколико је дозвољен значајан раст инвестиција [1].

### 5.2.2. Утицај на пејзаж

Квалитет визуелног ефекта је битан за јавност, која се упорно опире прихватању промена на животној средини са визуелног аспекта. Проблем је посебно значајан и присутан у хидроелектранама у вишим планинским и урбаним подручјима. Ова брига је повремено манифестована у форми коментара јавности и чак у правним изазовима за оне инвеститоре који имају за циљ промену вољених пејзажа изградњом хидроелектрана. Свака од грађевинских компоненти мале хидроелектране (машинска зграда, брана, прелив, цевовод, захват, одводни канал), може да измени визуелни доживљај увођењем форми контраста, линија, боја или текстура. Конструкција, локација и појава било које од поменутих компоненти, може бити одлучујућа за одобравање пројекта од стране јавности. Већина ових компоненти, чак и највеће, могу бити заклоњене вегетацијом и пејзажом. Бојењем у неконтрасне боје и текстуре, како би се добиле нерелевантне површине, компоненте ће се спојити или употпунити карактеристичан пејзаж. Креативан труд, обично са малим ефектом на укупан буџет пројекта изградње, може често резултирати пројектом прихватљивим за све стране: локалне власти, националне и регионалне агенције, еколога итд.

Доводни цевовод је обично главни узрок неприлика. Његова изградња мора бити добро планирана узимајући у обзир сваку природну компоненту - стене, земљиште, вегетацију, за покриће и ако нема другог решења, бојење како би се минимизирао контраст са позадином. Ако се брана може закопати, то је обично најбоље решење, иако се оператори морају суочити са неким недостацима у смислу одржавања и контроле. Машинска зграда, са захватом, водовима и електро водовима мора бити вешто уклопљена у природни пејзаж. Било која стратегија за ублажавање утицаја мора бити инкорпорирана у пројекат, обично без пуно додатних трошкова за олакшавање добијања дозволе.

Мале акумулације, као она присутна у Кордињенис (Cordiñanes - област на северу Шпаније) на слици 5.1. имају неке позитивне стране. Постојање скоро стабилног нивоа воде, обезбеђује низ туристичких атракција (пливање, риболов, кануи, итд.), које су противтежа негативних ефеката.



**Слика 5.1.** Спољашњи изглед и шематски приказ Кордињенис пројекта

Брана је релативно лака бетонска конструкција, али висина од 14 m је најуочљивија компонента на пејзажу (слика 5.2.). Ова висина је неопходна, јер вода мора достизати ниво старих канала који су реконструисани и чине део канала за провођење. То је конкретно разлог зашто ниво воде у акумулацији не сме варирати више од 2 m и тиме даје захвату карактеристику живописног језера.



**Слика 5.2.** Кордињенис брана

Отворени канали су изграђени у појачаним бетонским испустима, од одводног улаза (слика 5.3.), са одељком 2 x 2,5 m и дужином од 1335 m, потпуно закопаним и прикривеним подлогом од земље и вегетације.



**Слика 5.3.** Водозахват

Слике 5.4. и 5.5. приказују изградњу канала у три фазе: ископавање земље, ојачање канала бетонирањем и завршени канал са обновљеном вегетацијом.

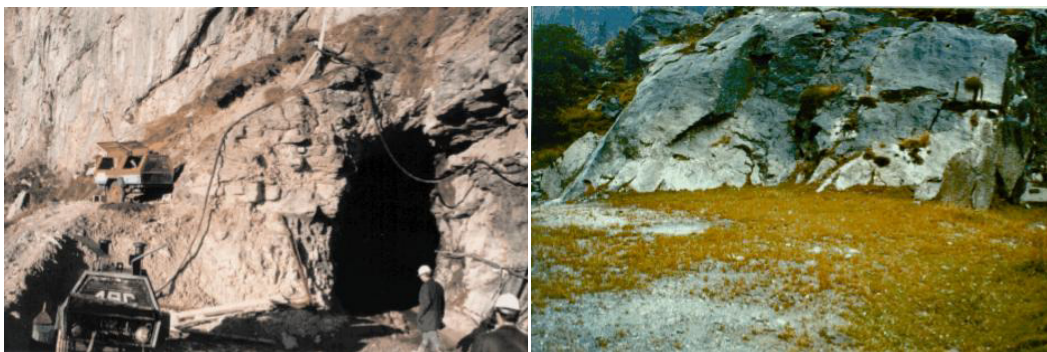


**Слика 5.4.** Фаза изградње: лево- ископавање, десно- изградња



**Слика 5.5.** Фаза изградње - завршен канал

На слици 5.6. лево се може видети тунел који се реконструише; а на десној канал који је повезан са тунелом који је покривен, као и остатак канала, укључујући и улаз у тунел. Од басена са водом челичним цевоводом, пречника 1,40 m и дужине 650 m, се вода одводи до турбина. У првих 110 m, цевовод има нагиб од близу 60°, у 2,5 x 2 m ископаном рову у стени. Ров је испуњен обојеним бетоном како би се уклопио са околним стенама.



**Слика 5.6.** Улаз у тунел током радова-лево и затрпан улаз у тунел -десно

Неколико метара пре уласка у машинску зграду, цевовод се рачва на пар мањих цевовода који снабдевају водом под притиском две Франсисове турбине. Машинска зграда (слика 5.7.) је слична планинским кућама. Њени спољашњи зидови од кречњака, стари црепови и тешки дрвени прозори не одају индустријску намену објекта. Зграда је до две трећине своје висине укопана, што такође доприноси бољој визуализацији[1].



Слика 5.7. Машинска зграда

### 5.2.3. Биолошки утицај

Значајни део малих хидроелектрана су проточне, код којих се вода преусмерава из речног тока струје или језера у хидроелектрану, која је понекад и пар километара удаљена од захватања воде како би се остварио потребан пад. Редукција водотока између тачке захватања и доње воде (низводно од електране), може утицати на мрешћење, инкубацију и гајење и пролаз рибе, животни простор за велике рибе [1].

Изградња успорних објеката на рекама мења еколошке услове за живот и развој одговарајућих биоценоза, а ти утицаји су следећи:

- преграђују се бранама путеви за миграцију риба према мрестилиштима;
- отежава се мрест рибљих врста којима је за то потребна текућа вода;
- мењају се хидролошки, хидрохемијски и хидробиолошки режими, што утиче на услове за развој низа рибљих врста;
- погоршавају се услови низводне миграције риба после мреста и рибље млађи;
- пошто промена животних услова различито делује на поједине рибље врсте, по правилу неповољно, нарушавају се равнотежни еколошки односи у изграђеном дела водотока и услови за опстанак неких врста.

Да би се неутралисали неповољни утицаји хидроенергетских објекта, предузимају се бројне мере:

- у оквиру успорних објеката предвиђају се постројења која обезбеђују узводну и низводну миграцију риба;
- посебним уређајима спречава се прилаз риба постројењима где би биле физички уништене;

- граде се вештачка мрестилишта, те се из њих у водоток убацује рибља млађ, како би се компензовали неповољни ефекти у погледу мреста;
- водопривредним мерама (испуштање биолошког минимума низводно до бране) обезбеђују се неопходни услови за живот и миграцију риба;
- обезбеђују се посебна природна мрестилишта у зони ушћа реке и слично [3].

Минимални проток у водотоку који је неопходно обезбедити за одржавање речне флоре и фауне назива се биолошки минимум. Постоји више метода за процену вредности биолошког минимума који могу бити:

- Методи базирани на хидролошким или статистичким вредностима, где се једна група метода се односи на средњу вредност протока реке на датом проточном пресеку. Друга група метода се односи на минимални средњи проток воде у реци, док се трећа група метода односи на предефинисане вредности криве трајања протока.
- Методи базирани на физиографским принципима који обично узимају у обзир константни специфични резервни ток ( $l/s/km^2$  сливног подручја).
- Изрази засновани на брзини и дубини воде, где брзина воде мора бити од 0,3 m/s до 2,4 m/s и дубину воде која мора бити од 10 cm до 24 cm. Други изрази се дефинишу резервисани ток у функцији од ширине реке (30-40 l/s по метру ширине) или оквашеног обима (најмање 75% од оквашеног обима првобитног тока).
- Методи базирани на планирању више циљева узимајући у обзир еколошке параметре. Користи се више посебних метода: MODM (Доношење одлука са више циљева) - узима у обзир и еколошке и економске циљеве. Коефицијент разводњавања - потребан проток мора бити најмање 10 пута од примењеног, биолошки чистог протока. Брзина не сме пасти испод 0,5 m/s, параметри тока - ефекти резервног тока се мере помоћу модела, PHABSIM - базира се на познавању комбинације параметара (дубине воде, брзине речног тока, температуре и седимента), које већина рибљих врста захтева, модел прогнозирања средине - на бази неколико агегатно - морфолошких параметара, услови резервног тока релевантни за биогенезу се прорачунавају [1].

#### **5.2.3.1. Узводни пролази за рибе**

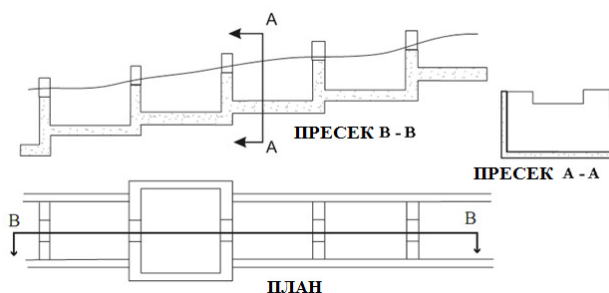
Нацрти за ефективни пролаз рибе у специфичним областима захтевају добру комуникацију између инжењера и биолога, и разумевање карактеристика области. Узводни пролази се могу обезбедити уз помоћ неколико алата: степенстих брана, лифтова, пумпи и транспортних операција. Велика разноврсност у конструкцијама система за пролаз риба, је главни приступ у малим хидроелектранама. Сама област, критеријум специфичности рибљих врста и трошкови, детерминишу најприкладније решење. Системи пролаза за рибе (природни заливи без степеница, базени и бране, Денил пролази, вертикални отвори, хибриди итд.) се могу направити да би се обезбедила прилагодљивост рибама које су пливачи при површини, при дну речног тла

или ушћа. Како било, неће све врсте риба користити степенасте преливе - бране. Лифтови и бране за рибе су погодни за рибе које не користе степенасте бране.

Најчешћи рибљи пролази су преливи и базени; низ базена са водом која протиче од базена до базена преко правоугаоних брана. Ту базени имају двоструку улогу, да обезбеђују одморишни простор и испуштају енергију од воде која пада низ степенишну брану. Величина и ширина базена мора бити у функцији бриге о рибама и у том циљу базени могу имати:

- преграде са отворима тако да и рибе и седименти могу проћи,
- преграде са доњим отворима довољним за пролаз риба,
- преграде са вертикалним и доњим отворима.

Базени одвојени преградама са доњим отворима једино немају практичну корист, јер су ограничени за рибе које пливају при дну. Систем правоугаоних брана као на слици 5.8. је најстарији, али је непогодан у случају да горњи ток варира, јер ток пролаза за рибе расте или опада, резултирајући пролазом са превише малим или великим током.



**Слика 5.8.** Систем правоугаоних брана

Такође ове врсте степенастих брана не могу правовремено да пропусте седименте па се изводе са доњим отворима за ову сврху. Слика 5.9. приказује једну од степенастих брана са рустичном конструкцијом направљеном за лососе, испитиване у рекама Шпаније.

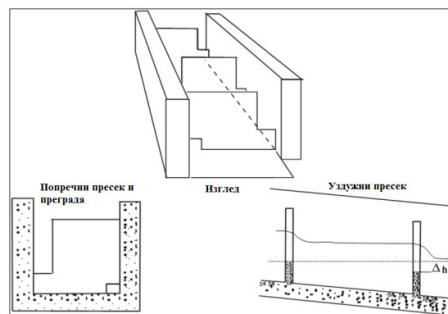


**Слика 5.9.** Пролаз за рибе- рустична конструкција

Слика 5.10., илуструје рибљи степенести пролаз са вертикалним отворима и доњим пролазима. Облик и размештај преграда су приказани на слици 5.11., где ширина базена за дужину између 1,8 и 3 m, варира од 1,2 m до 2,4 m. Пад између базена је од 10 - 30 cm. У принципу величина и пад зависе од врсте система. Компјутерски програми оптимизирају ширину и дужину базена, пад између базена и хидрауличко оптерећење.

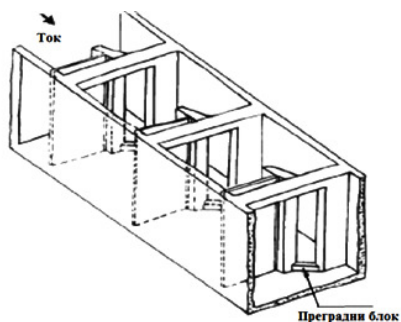


**Слика 5.10.** Пролаз са вертикалним отворима



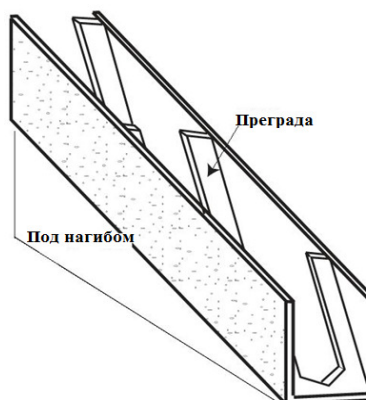
**Слика 5.11.** Пролаз са попречним преградама

Рибљи пролаз са вертикалним отворима (слика 5.12.) је веома популаран у САД-у, али недовољно познат у Европи. Кроз преграде са вертикалним отворима пролазе и рибе и седименти. Стандардни модел има базене ширине 2,5 m и 3,3 m дугачке, са 30 cm широким отворима. Поборници ове врсте степенастих брана хвале њену хидрауличку стабилност чак и при великим флуктацијама протока.



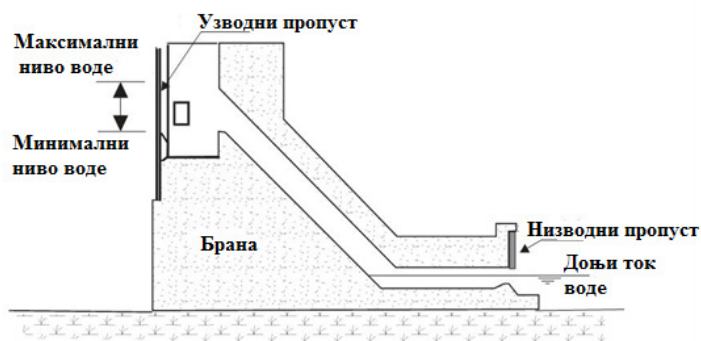
**Слика 5.12.** Пролаз са вертикалним отворима

Денил рибљи пролаз је стрм и састоји се од узаних сабирних канала са претходницом на дну и странама илустрованих на слици 5.13. Ове претходнице растурају енергију обезбеђујући ток мале брзине уз који се рибе могу лако успињати. Ове карактеристике дозвољавају Денил да се користи уз нагиб до 1:5. Они такође производе турбулентни ток који је много погоднији за већину риба у односу на проток од пролаза у виду базена и толерантан је за варирање дубине воде.



**Слика 5.13.** Сабирни канали и претходнице Денил пролаза за рибе

Борланд брана (слика 5.14.) је релативно јефтино решење за трансфер рибе од испусног канала до базена у средишњем насипу. Риба се успиње уз ниску степенасту брану до доњих комора. Улаз у доњу комору је затворен и окно које продире од њега до врха насипа испуњава се водом која протиче од басена и преко горње коморе. Када се испуни, рибе које су привучене овим током су ближе базену у коме могу пливати.



**Слика 5.14.** Пресек Борланд бране

На вишим насипима, најбоље решење је поставити лифт специјално пројектован за ову сврху. У супротном, једино могуће решење је ухватити рибе и транспортовати их безбедно узводно. Све што је потребно је мали пролаз за рибе којим ће се оне пребацивати од испусног канала до клопке - мреже. Уз употребу механичких алата, рибе се концентришу у спремиште и пребацују у колица. У неким случајевима се из спремишта директно пребацују преко врха бране у резервоар.

Најважнији елемент система за пролаз рибе и најтежи за пројектовање, за постизање максималне ефективности је део за прихват рибе. Део за прихват рибе доводи рибу у доњи део пролаза и требало би да буде пројектован да искористи предности миграције рибе у потрази за јачом струјом и избегавањем уколико је превише јака. Брзина тока мора да буде довољно велика да привуче рибе даље од прелива и испусног канала.

Брзина речног тока на улазу у пролаз за рибе варира у зависности од врсте рибе која пролази, али за лососа и пастрмку креће се од 2 од 3 m/s. Недостатак погодне брзине тока може резултирати у одлагању миграције с обзиром да рибе постају збуњене и круже тражећи улаз. Уколико је то неопходно вода се мора додавати у пролаз из испусног канала, али обично се довољно воде може узети на горњем доводу или басену и преусмерити ка пролазу за рибе. Вода се може упумпати на самом улазу пролаза, избегавајући да се преноси целом дужином (слика 5.15).



Слика 5.15. Водозахват

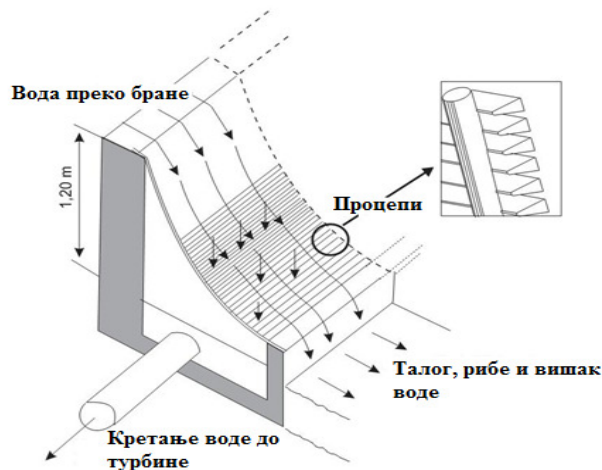
Улаз у пролаз би требало да буде лоциран близу бране с обзиром да лосос обично тражи улаз кружећи околу. У постројењима са ниским падом, улаз треба бити у плићак близу напајања. Горњи испусни отвор пролаза за рибе не би требало да буде смештен близу прелива, где постоји опасност да се поврати назад у дно бране, или у области виров, где риба може бити угрожена. Пролази за рибе морају бити заштићени од ловокрадица, затварањем или жичаном мрежом или челичном облогом.

### 5.2.3.2. Пролази за рибе (доњи ток)

У прошлости рибе које су мигрирале ка доњем току су пролазиле кроз турбину. Помор риба повезан са овим методом може бити и чак до 40%, у зависности од врсте и пројекта турбине и у већој мери од периферне брзине радног кола. Турбине које функционишу са падом од 12 m изазивају исти морталитет као и оне које раде са падом од 120 m. Механичке повреде услед судара са чврстим телима - усмерним органима или лопатицама радног кола, изложеност подпритисцима и ефектима „сечива“ које продукују струјања високим брзинама у супротним смеровима од главног тока, главни су узроци смртности риба.

За заштиту риба се од недавно користи мрежа са самопречишћавањем на захвату, који не захтева погон. Мрежа користи коанда ефекат, феномен по коме течност има

тенденцију да прати површину чврстих тела на коју наилази на свом путу. Уз то, мрежну секцију чине елементи облика „V“ распоређени на носећим стубовима (слика 5.16.), чинећи мрежну површину која изазива смицање дуж површине мреже.



Слика 5.16. Коанда мрежа

Вода тече ка систему за прикупљање воде ка турбини, кроз отворе мреже, који су обично 1 mm широки. Око 90% чврстог материјала у води, чија се брзина повећава на подлози за убрзање, пролазе преко мреже чиме се истовремено обезбеђује висок ниво заштите турбине. Водени свет је такође заштићен од улаза у турбину. У ствари, глатка површина челичне нерђајуће мреже омогућава одличан пролаз за рибе. Мрежа може да поднесе 250 l/s по дужном метру мреже. Недостатак ове врсте мреже је у томе што захтева око 1 до 1,20 m губитак пада воде, да спроведе воду од захвата до система за прикупљање воде. То може бити неекономично у системима са ниским падом.

#### 5.2.3.3. Систем управљања понашањем

Систем управљања понашањем и разноврсност алтернативних технологија за преусмеравање или привлачење рибе која мигрира ка доњем току је био предмет студије од стране Института за истраживања електричне енергије (ERPI). Ове технологије укључују стробоскопска светла за одбијање рибе, живина светла за привлачење рибе, средства за производњу звука позната као „чекић“, за одбијање рибе као и знатан број система за електрично навођење. Још увек није демонстрирано да ови систем могу бити поуздано коришћени. Технике за управљање понашањем зависе од локације и врсте риба.

#### 5.2.4. Утицаји на копно

Отворени канали могу често бити препрека слободном пролазу животиња. Како би се то избегло отворени канали су сада затрпани и засађени вегетацијом, тако да не

представљају било какву баријеру. Насупрот томе, за закопавање конструкција за пренос воде се тврди да представља губитак воденог света. Има извештаја о томе да животиње понекад упадају у отворени канал, без изгледа за излаз из њега због правоугаоног облика. Извесне степенасте конструкције могу послужити, а са знатно нижим трошковима. Други конструкциони радови у вези са малим хидроелектранама немају еколошки утицај вредан помена.

#### **5.2.5. Отпадни материјал**

Већина малих хидроелектрана имају машине за чишћење отпадних материјала, које отклањају материјал из воде како би се спречио њихов улаз у постројење са водом и оштећења електромеханичке опреме или пад хидрауличких перформанси. Сваке године тоне материјала (обично пластичне кесе, флаше, и друге врсте отпада као што су стари аутомобили, лишће и природни материјали) се уклањају из воде. У многим државама, када се предмет (укључујући и органски материјал - лишће, итд.) једном уклони из главног тока, аутоматски постаје отпадни материјал. У овом случају исти се не може поново бацити у воду, већ мора правилно бити уклоњен често узрокујући веома високе трошкове.

Са оваквом ситуацијом, јасно је да мале хидроелектране имају веома важну улогу у заштити животне средине. Ова корист за реку је често непопуларизована, али јасно репрезентује позитивни ефекат и требало би га узети у обзир. Одговарајуће мере подршке се морају предузети да би редуковао ефекат економских баријера на мале хидроелектране везано за овај проблем (смањење накнада за уклањање отпада или примена различитог третмана за органски и неоргански материјал) [1].

## 6. Закључак

Коришћење енергије из обновљивих извора је све израженији тренд у целом свету, а посебна пажња се поклања искоришћењу хидропотенцијала. Потреба да се потенцијали у Србији искористе, сведочи и то да постоји велики број локација на којима се испитују техничке могућности за изградњу малих хидроелектрана. Поред ових постоје и локације које су на неки начин већ искоришћене, на којима су изграђени пратећи објекти, али у које се годинама није улагало па се тежи њиховом обнављању и модернизацији.

Упознавањем са основним грађевинским елементима малих хидроелектрана и њиховим адекватним одабиром кроз прорачун, можемо уочити колики утицај имају у реалним условима. Може се рећи да је услов за рад на пројектима изградње и утицаја грађевинских елемената прихватљив, само уколико се ускладе препоручене, искуствене и теоријске вредности које су у овом раду комбиноване. Циљ и јесте да се кроз разноврсност у начину градње објеката, њиховој конструкцији и коришћења различитих грађевинских материјала, као и вештином у одабиру истих, да најповољније решење за искоришћење неког хидропотенцијала.

Отвара се могућност да се за поједине речне токове на тешко приступачним теренима нађе најбоље решење за њихово искоришћење. Значајан ефекат градње малих хидроелектрана, могу настати и због релативно великог домаћег учешћа радне снаге и индустрије, које је у оваквим малим пројектима вероватније и веће него што је у случају код великих постројења.

## 7. Литература:

- [1] Гордић Душан: „Обновљиви извори енергије 2 - мале хидроелектране”, скрипта, Машински факултет Крагујевац, Крагујевац 2012.
- [2] Перић Јачим, „Хидраулични мотори и постројења”, Београд, 1952.
- [3] Ђорђевић, Б.: „Коришћење водних снага” – Објекти хидроелектрана, Научна књига и Грађевински факултет у Београду, Београд, 1989.
- [4] <http://www.scribd.com/doc/95205232/04Energija-Vode-Hydro-Energy>
- [5] <http://www.eps.rs/test/malei.pdf>
- [6] „Снага мораче ” Министарство економије, Влада Црне Горе 2010.
- [7] Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant, ESHA 2004.
- [8] Проф. др. Петар Вукосављевић, Доц. др Урош Караџић, „Основе Механике флуида” ,Подгорица 2010)
- [9]. Добрица Миловановић: „Транспорт флуида” скрипта, Машински факултет Крагујевац 2010
- [10] Бераковић Борис, Куспилић Невен,Пршић Марко: „Хидротехничке грађевине”,Грађевински факултет, Загреб 2011.
- [11] Петар Стојић: „Хидротехничке грађевине”- књига 1., Грађевински факултет, Сплит 1997.
- [12] Борис Бераковић, Невен Куспилић, Марко Пршић,„Хидротехничке грађевине”,Грађевински факултет, Загреб 2008.

## **Прилог 1**

Усвојене вредности за прорачун су:

Максимални проток:  $Q_{\max} := 3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Називни проток се креће у усвојеним границама:  $Q := 0.15, 0.25 \dots 3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Бруто пад (висинска разлика):  $H_b := 85 \text{ m}$

Дужина цевовода:  $L := 173 \text{ m}$

Убрзање силе земљине теже:  $g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Густина воде:  $\rho := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

### ПРОРАЧУН:

Усвојени коефицијент за челични цевовод:  $n := 0.012$

Пречник цевовода:  $d := 2.69 \cdot \left( \frac{n^2 \cdot Q_{\max}^2 \cdot L}{H_b} \right)^{0.1875} = 0.884 \text{ m}$

Усваја се стандардна вредност пречника цевовода:  $\underset{\text{ww}}{d} := 1 \text{ m}$

Површина проточног пресека цевовода:  $A_c := \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = 0.785 \text{ m}^2$

Брзина струјања воде у цевоводу у зависности од протока се добија једначином:

$v(Q) := \frac{Q}{A_c} \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$v(Q) =$

|       |
|-------|
| 0.191 |
| 0.318 |
| 0.446 |
| 0.573 |
| 0.7   |
| 0.828 |
| 0.955 |
| 1.082 |
| 1.21  |
| 1.337 |
| 1.464 |
| ...   |

Кинематска вискозност за воду:  $\nu := 1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

Рејнолдсов број (режим струјања) у зависности од протока се добија једначином:

$$R_e(Q) := \frac{d \cdot v(Q)}{\nu}$$

$$R_e(Q) =$$

|                       |
|-----------------------|
| 1.91·10 <sup>5</sup>  |
| 3.183·10 <sup>5</sup> |
| 4.456·10 <sup>5</sup> |
| 5.73·10 <sup>5</sup>  |
| 7.003·10 <sup>5</sup> |
| 8.276·10 <sup>5</sup> |
| 9.549·10 <sup>5</sup> |
| 1.082·10 <sup>6</sup> |
| 1.21·10 <sup>6</sup>  |
| 1.337·10 <sup>6</sup> |
| 1.464·10 <sup>6</sup> |
| 1.592·10 <sup>6</sup> |
| 1.719·10 <sup>6</sup> |
| 1.846·10 <sup>6</sup> |
| ...                   |

Максимални притисак радне течности:  $p_{\max} := H_b \cdot \rho \cdot g = 8.338 \times 10^5 \text{ Pa}$

Затезна чврстоћа материјала цеви:  $\sigma_d := \frac{400}{10^{-6}} = 4 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

## ПРОРАЧУН УСПУТНИХ ГУБИТАКА

Вредност коефицијента храпавости (табела 2.1) за челине цеви:  $e := 0.006 \text{ mm}$

Коефицијент отпора, се рачуна према обрасцу Фон Кормана:  $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} := 2 \cdot \log\left(3.7 \cdot \frac{d}{e}\right)$

Из израза се добија коефицијент отпора :  $\lambda := \left(\frac{1}{2 \cdot \log\left(3.7 \cdot \frac{d}{e}\right)}\right)^2 = 0.0321156$

Коефицијент за заварену челични цевовод:  $n := 0.012$

Прорачун губитака услед трења у зависности од протока, се добија Манинговом једначином:

$$h_f(Q) := \left( \frac{10.3 \cdot n^2 \cdot Q^2}{d^{5.333}} \right) \cdot L \quad \text{m}$$

$$h_f(Q) =$$

|                        |
|------------------------|
| 5.773·10 <sup>-3</sup> |
| 0.016                  |
| 0.031                  |
| 0.052                  |
| 0.078                  |
| 0.108                  |
| 0.144                  |
| 0.185                  |
| 0.232                  |
| 0.283                  |
| 0.339                  |
| 0.401                  |
| 0.468                  |
| 0.539                  |
| 0.616                  |
| 0.699                  |
| ...                    |

### ПРОРАЧУН ЛОКАЛНИХ ГУБИТАКА

1) Губици на решетке

Пречник шипке:  $t := 0.012 \quad \text{m}$

Растојање између шипки:  $b := 0.070 \quad \text{m}$

Угао решетке и хоризонтале 60°:  $\phi := \frac{\sqrt{3}}{2}$

Површина решетке:  $A_r := 5 \quad \text{m}^2$

Усвојена вредност коефицијента дефинисана за аутоматску грабуљу:  $K_1 := 0.80$

Брзина испред решетке се добија једначином:  $v_o(Q) := \frac{Q}{K_1} \cdot \left( \frac{b+t}{b} \right) \cdot \left( \frac{1}{A_r} \right) \cdot \left( \frac{1}{\phi} \right) \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Брзина воде испред решетке која зависи од протока, према наведеној једначини је:

$$v_o(Q) =$$

|       |
|-------|
| 0.051 |
| 0.085 |
| 0.118 |
| 0.152 |
| 0.186 |
| 0.22  |
| 0.254 |
| 0.287 |
| 0.321 |
| 0.355 |
| 0.389 |
| ...   |

Коефицијент који зависи од облика шипке (усвојена вредност):  $K_t := 2.4$

Губици на решетки у зависности од протока, се добијају коришћењем Кирхмерове једначине:

$$\Delta h_{vIR}(Q) := K_t \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{v_o(Q)^2}{2 \cdot g}\right) \cdot \phi \quad m \quad \Delta h_{vIR}(Q) =$$

|                       |
|-----------------------|
| $2.596 \cdot 10^{-5}$ |
| $7.21 \cdot 10^{-5}$  |
| $1.413 \cdot 10^{-4}$ |
| $2.336 \cdot 10^{-4}$ |
| $3.49 \cdot 10^{-4}$  |
| $4.874 \cdot 10^{-4}$ |
| $6.489 \cdot 10^{-4}$ |
| $8.335 \cdot 10^{-4}$ |
| $1.041 \cdot 10^{-3}$ |
| $1.272 \cdot 10^{-3}$ |
| $1.526 \cdot 10^{-3}$ |
| $1.803 \cdot 10^{-3}$ |
| $2.103 \cdot 10^{-3}$ |
| $2.426 \cdot 10^{-3}$ |
| ...                   |

2) Губитак услед наплог проширења или сужења (на улазу у цевовод):

Коефицијент улазних губитака споја резервоара и цеви (усвојена вредност):  $K_e := 0.8$

Губитак на споју резервара и цеви у зависности од промене протока је одређена једначином:

$$\Delta h_c(Q) := K_e \cdot \frac{v(Q)^2}{2 \cdot g} \quad \text{m} \quad \Delta h_c(Q) =$$

|                        |
|------------------------|
| 1.487·10 <sup>-3</sup> |
| 4.131·10 <sup>-3</sup> |
| 8.097·10 <sup>-3</sup> |
| 0.013                  |
| 0.02                   |
| 0.028                  |
| 0.037                  |
| 0.048                  |
| 0.06                   |
| 0.073                  |
| 0.087                  |
| 0.103                  |
| 0.12                   |
| 0.139                  |
| ...                    |

Бруто пад на почетку цевовода под притиском (умањен за губитке у решетки и на улазу у цевовод), а у зависности од промене протока, се одређује:

$$H_{bstv}(Q) := H_b - \Delta h_c(Q) - \Delta h_{vIR}(Q) \quad \text{m} \quad H_{bstv}(Q) =$$

|        |
|--------|
| 84.998 |
| 84.996 |
| 84.992 |
| 84.986 |
| 84.98  |
| 84.972 |
| 84.962 |
| 84.951 |
| 84.939 |
| 84.926 |
| 84.911 |
| 84.895 |
| 84.877 |
| ...    |

3) Губитак у кривинама:

Радијус кривине (дато поставком):  $R := 4 \text{ m}$

Однос радијуса кривине и пречника цеви:  $\frac{R}{d} = 4$

Однос релативне хrapавости цеви и пречника цеви:  $\frac{e}{d} = 6 \times 10^{-3}$

Коефицијенти локалног отпора за три кривине се усваја (табела 2.6):

$$K_{b1} := 0.05$$

$$K_{b2} := 0.08$$

$$K_{b3} := 0.12$$

Губици у кривинама у зависности од промене протока, се одређују једначином:

$$\Delta h_{vk}(Q) := (K_{b1} + K_{b2} + K_{b3}) \cdot \frac{v(Q)^2}{2 \cdot g} \quad \text{m} \quad \Delta h_{vk}(Q) =$$

|                       |
|-----------------------|
| $4.648 \cdot 10^{-4}$ |
| $1.291 \cdot 10^{-3}$ |
| $2.53 \cdot 10^{-3}$  |
| $4.183 \cdot 10^{-3}$ |
| $6.249 \cdot 10^{-3}$ |
| $8.727 \cdot 10^{-3}$ |
| 0.012                 |
| 0.015                 |
| 0.019                 |
| 0.023                 |
| 0.027                 |
| 0.032                 |
| 0.038                 |
| ...                   |

4) Губици у вентилима:

Коефицијент локалног губитка за табласти затварач:  $K_v := 0.2$

Губитак у затварању који зависи од протока се добија једначином:

$$\Delta h_{vv}(Q) := K_v \cdot \frac{v(Q)^2}{2 \cdot g} \quad m \quad \Delta h_{vv}(Q) =$$

|                        |
|------------------------|
| 3.718·10 <sup>-4</sup> |
| 1.033·10 <sup>-3</sup> |
| 2.024·10 <sup>-3</sup> |
| 3.346·10 <sup>-3</sup> |
| 4.999·10 <sup>-3</sup> |
| 6.982·10 <sup>-3</sup> |
| 9.296·10 <sup>-3</sup> |
| 0.012                  |
| 0.015                  |
| 0.018                  |
| 0.022                  |
| 0.026                  |
| 0.03                   |
| ...                    |

Нето пад и крива трајања протока:

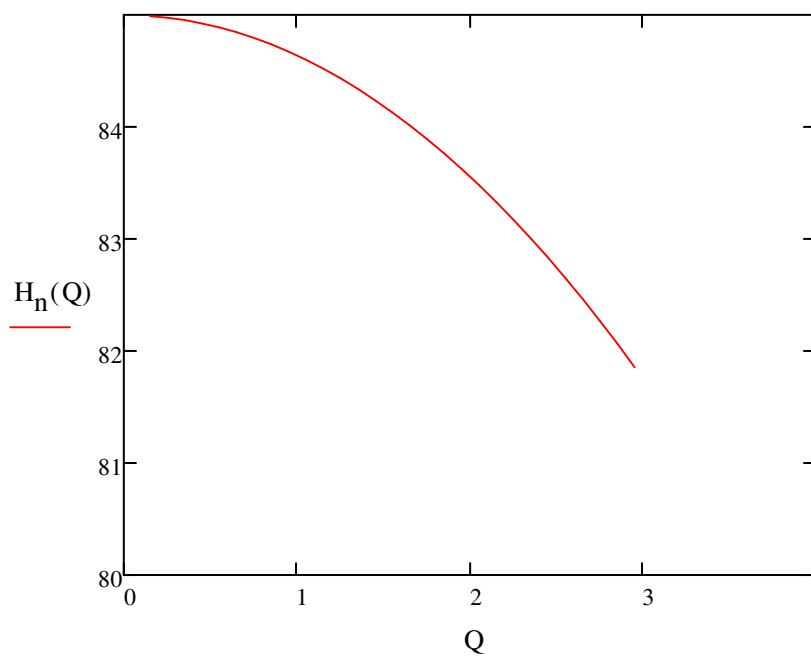
Нето пад се добија умањењем бруто пада за вредност прорачунатих губитака, а зависи од протока.

$$H_n(Q) := H_b - h_f(Q) - \Delta h_{vIR}(Q) - \Delta h_c(Q) - \Delta h_{vv}(Q) - \Delta h_{vk}(Q) \quad m$$

$$H_n(Q) =$$

|        |
|--------|
| 84.992 |
| 84.977 |
| 84.956 |
| 84.927 |
| 84.891 |
| 84.847 |
| 84.797 |
| 84.739 |
| 84.674 |
| 84.602 |
| 84.523 |
| 84.436 |
| 84.342 |
| ...    |

Крива трајања протока, према добијеним вредностима приказана је на дијаграму:



Укупан губитак мањи од 4%:

$$\frac{84.992 - 81.858}{84.992} \cdot 100 = 3.687$$