

Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Обновљиви извори енергије 2

Број индекса: 336/2010

Жарко Љ. Гавриловић

**Пројектовање и моделирање мале
хидроелектране на реци Ибар**
мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Професор Др Душан Гордић

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Резиме

Непрестано црпљење фосилног горива доводи до његове високе цене, односно раста цена сваке године. Због развијања индустрије и повећавања популације на планети овај раст цена се неће смањивати. Зато се последњих година агилније улази у пројекте обновљивих извора енергије. Наравно, у зависности од могућности и од поднебља различити обновљиви извори енергије долазе у обзир као нпр. енергија ветра, енергија таласа, соларна енергија, енергија биомасе, хидроенергија итд. Међутим, да би се отпочело са неким пројектом обновљивих извора енергије морају се извршити одређена мерења, анализе и видети колико је то исплативо. У супротном, може се десити да обновљив извор енергије буде и скупљи од фосилног због чега би улагање у такав пројекат било чисто губљење времена и новца.

Технички искористив хидроенергетски потенцијал Србије износи око 20 TWh. Данас се углавном користи економско оправдани део овог потенцијала у "великим" електранама снаге преко 10 MW. ЕПС је у 2010. години у својим хидроелектранама укупног капацитета од 2.835 MW произвео око 12,5 TWh електричне енергије (око 34 % укупне производње електричне енергије). Највећи део преосталог потенцијала за изградњу великих хидроелектрана је у сликовима река Дрине и Лима, Мораве и Дунава. Значајан део преосталог неискоришћеног хидропотенцијала Србије налази се и у опсегу мале хидроенергетике. У прошлости је урађено неколико анализа потенцијала за изградњу МХЕ, а најзначајнији документ је "Катастар малих хидроелектрана у Србији ван покрајина", израђен 1987. године. У њему је описано 856 локација за изградњу МХЕ, снаге од 90 kW до 8,5 MW, укупне снаге 449 MW и годишњег потенцијала од 1,59 TWh.

Овај рад је одрађен на примеру једног реалног модела. У њему су дефинисане хидроенергија, мале хидроелектране, који су њени основни облици, какве имају предности а какве мане. Дефинисане су основне хидролошке карактеристике реке Ибар у профилу мале хидроелектране као и меродавне мале, средње и велике воде у истом профилу. Такође, одрађен је сав хидрограђевински, машински, хидромашински и електротехнички део као и целокупна економска анализа односно период исплативости и профитабилност пројекта. У програмском пакету CATIA V5R20 измоделирано је цело хидроенергетско постројење помоћу добијених података.

Кључне речи: Обновљиви извори енергије, мале хидроелектране, река Ибар,

Abstract

Constantly pumping fossil fuels leads to its high cost and price growth every year. Due to the development of industry and increasing population on the planet this price increase will not decrease. Therefore, in recent years agile enters renewable energy projects. Of course, depending on the features and climate of various renewable energy sources come to mind as an example. wind energy, wave energy, solar, biomass, hydropower, etc.. However, in order to enter into a renewable energy project must perform a certain measurement, analysis and see how much it cost. Otherwise, it may be a renewable source of energy is more expensive than fossil why should invest in this project was purely a waste of time and money.

Technically feasible hydro potential in Serbia is about 20 TWh. It is used mainly justified by the economic potential of this part of the "large" power plants over 10 MW. EPS

in 2010. year in its power plants with total capacity of 2835 MW generated about 12.5 TWh of electricity (about 34% of total electricity production). Most of the remaining potential for building large hydropower plants in the basins of the rivers Drina and Lim, Morava and Danube rivers. A significant portion of the remaining unused hydro potential is located in Serbia and in the range of small hydro. In the past, done some analysis of the potential for the construction of MHE, a most important document is the "Cadastre of small hydro power plants in Serbia outside the province," made 1987th year. It describes 856 sites for the construction of MHE, the power of 90 kW to 8.5 MW, total capacity 449 MW and an annual potential of 1.59 TWh.

This work was done on the example of a real model. It defines hydropower, small hydro plants, which are its basic forms, what are the advantages and some disadvantages. It defines the basic hydrological characteristics of the river Ibar in the profile of small hydro and authoritative small, medium and high flows in the same profile. Also done it all hydro engineering, mechanical, and electrical hydromechanical part, and complete economic analysis or cost-effectiveness and profitability of the period of the project. The software package CATIA V5R20 modeled the whole hydro facilities using the obtained data.

Keywords: Renewable energy, small hydro, Ibar river,

Садржај

1.0 Увод.....	5
2.0 Хидроенергија	7
2.1 Хидроелектране.....	7
2.2 Мале хидроелектране.....	8
2.2.1 Дефиниција МХЕ.....	8
2.2.2 Основни облици извођења МХЕ	8
2.2.3 Предности и мане МХЕ	13
3.0 Река Ибар и њен слив	14
3.1 Подручје за изградњу мале хидроелектране	15
4.0 Мала хидроелектрана Бресник	16
4.1 Основне карактеристике МХЕ Бресник.....	16
4.2 Основне хидролошке карактеристике реке Ибар у профилу МХЕ Бресник.....	17
4.3 Дефинисање меродавних средњих вода и расподеле протока по месецима унутар године	18
4.4 Дефинисање меродавних малих вода.....	24
4.5 Дефинисање криве трајања дневних протока.....	25
4.6 Прорачун великих вода у профилу МХЕ Бресник.....	29
4.6.1 Прорачун великих вода у профилима МХЕ по методи граничног интензитета отицаја.....	31
4.7 Хидрограђевински део.....	34
4.7.1 Бетонска брана	35
4.7.2 Машинска зграда	36
4.8 Машински и хидромашински део.....	36
4.8.1 Дефинисање инсталисаног протока меродавног за прорачун снаге турбина МХЕ Бресник	38
4.8.2 – Избор параметара турбине.....	44
4.8.3 Хидромеханичка, хидромашинска и машинска опрема	48
4.8.4 Биланс вода у акумулацији.....	49
4.9 Електротехнички део	50
4.9.1 Генератори.....	50
4.9.2 Главни енергетски трансформатор и високонапонско постројење	51
4.9.3 Турбинска регулација и регулација побуде	52

4.9.4 Заштите	54
5. Економска анализа.....	56
5.1 Инвестициони трошкови	56
5.2 Трошкови инвестиционог и текућег одржавања.....	58
5.3 Трошкови на зараде и накнаде запослених	58
5.4 Трошкови осигурања	59
5.5 Трошкови амортизације.....	59
5.6 Укупни годишњи трошкови	60
5.7 Профитабилност пројекта	61
6.0 Моделирање МХЕ Бресник.....	62
Закључак	71
Литература.....	72

1.0 Увод

Енергија је неопходни предуслов и основни покретач свих производних и пратилац свих друштвених активности. Обим и структура потрошње енергије зависи од општег стања економије, посебно производног и услужног сектора, али и од општег нивоа развијености друштва, стандарда и навика грађана. [1]

Енергија је данас једна од најважнијих компоненти развоја привреде и друштва уопште. Енергетика има кључни геополитички значај при чему доминантан допринос оваквом стању стварају климатске промене и сигурност снабдевања енергентима, узимајући у обзир пре свега чињеницу да су резерве нафте и природног гаса ограничене и концентрисане у релативно малом броју држава. У свету преовладава општи став да је тренутно стање потрошње и искоришћавања ресурса неодрживо.

Данас се у свету потроши око 4 милијарди тона нафте годишње, што у поређењу са укупним резервама нафте од 120 – 160 милијарди тона, доводи до једноставног закључка да ће постојеће резерве нафте бити исцрпљене за мање од 40 година. Резерве гаса, уколико се настави са овим темпом потрошње, ће бити исцрпљене за око 60 година, док ће резерве угља бити исцрпљене за око 200 година.[2]

Да би се одржао привредни и друштвени развој а уједно штедела фосилна горива потребно је у што већој мери прећи на обновљиве изворе енергије. Обновљиви извори енергије представљају такав вид енергије који се обнавља истом брзином којом се и троши и уједно представља чисту енергију. Улога обновљивих извора енергије је битна, како са становишта економског развоја, тако и са становишта решавања проблема загађења животне средине. Коришћење ових извора доприноси ефикаснијем коришћењу сопствених потенцијала у производњи енергије, смањењу емисија “гасова стаклене баште”, смањењу увоза фосилних горива, развоју локалне индустрије и отварању нових радних места. Највећи проблем је у самом инвестирању у обновљиве изворе енергије код којих су највеће почетне инвестиције и због чега се са економске стране теже улази у реализацију оваквих пројеката.

У обновљиве изворе енергије спадају:

- хидроенергија,
- геотермална енергија,
- соларна (сунчева) енергија,
- енергија ветра,
- енергија биомасе,
- енергија плиме и таласа.

Обновљиви извори енергије су у већој мери почели да се користе тек у време прве велике енергетске кризе током седамдесетих година када добијају право место у енергетским потенцијалима иако су ови видови енергије познати од давнина. Битно је то да је свест људи о здравој и чистој енергији пробужена и да је употреба енергије ветра, сунца, биомасе, геотермалне и енергије малих водотокова све распрострањенија.

Производња електричне енергије из обновљивих извора данас је једнака петини укупне енергије која се добија из нуклеарних електрана, не укључујући у то велике хидро електране, које саме дају 18% светске електричне енергије. Ипак то је далеко од довољног и од могућег. Без обзира на свакодневну доступност енергије сунца, ветра или река, преко 1,5 милијарди људи у свету нема приступ електричној енергији. При томе свет се налази у стању константне енергетске кризе - резерве фосилних горива се смањују, расте број становника, а еколошки трошкови због трошења фосилних горива нарастају.

Поред обновљивости, сигурног профита, предност ових извора се огледа у сталном смањењу времена повраћаја уложених инвестиција, пре свега услед брзог развоја технологија које се примењују у експлоатацији ОИЕ. За само пет година, инвестиције у ОИЕ су се повећале 77%, а капацитети 32%. До 2050. године се пројектује убрзани раст капацитета, и то највише фотонапонске ћелије – 138 пута, соларних колектора 80 пута, геотермалне енергије 19,7 пута, а ветра 17,7 пута.

Хидроенергија је једна од најчистијих и најпоузданијих извора енергије. Ово је разлог зашто развијене земље као што су Нови Зеланд, Норвешка, Шведска и Швајцарска бирају хидроенергију за главни извор електричне енергије, укључујући све више и земље у развоју: Бразил, Кина, Етиопија, Индија, Лаос, Непал, Уганда и Замбија.[3]

Постојећи основни законски оквир који дефинише статус електроенергетике и ОИЕ у Србији чине:

1. Закон о енергетици ("Сл. гласник РС", бр. 57/2011);
2. Стратегија развоја енергетике Републике Србије до 2015. године ("Сл. гласник РС", бр. 44/2005);
3. Програм остваривања стратегије развоја енергетике Републике Србије до 2012 године ("Сл. гласник РС", бр.17 /2007).

Законом о енергетици уређују се циљеви енергетске политике и начин њеног остваривања, услови за поуздану, сигурну и квалитетну испоруку енергије и енергената, и услови за сигурно снабдевање купаца, услови за изградњу нових енергетских објеката, услови и начин обављања енергетских делатности, начин организовања и функционисања тржишта електричне енергије и природног гаса, права и обавезе учесника на тржишту, заштита купаца енергије и енергената, начин, услови и подстицаји за производњу енергије из обновљивих извора и комбиноване производње електричне и топлотне енергије, итд.

Стратегија, којом се уређује одрживи развој, дефинише националне приоритете одрживог развоја, међу којима је и подстицање коришћења обновљивих извора енергије у циљу заштите и унапређења животне средине и рационалног коришћења природних ресурса, смањења загађења и притисака на животну средину, коришћења природних ресурса тако да остану расположиви и за будуће генерације.

Програмом остваривања стратегије развоја су посебно детаљно сагледана три приоритета хидроенергетског сектора: модернизација и ревитализација постојећих хидроелектрана, изградња нових електрана и подстицање инвестиционих активности електроенергетског сектора Србије у Југоисточној Европи.

2.0 Хидроенергија

Хидроенергија је енергија која потиче од снаге воде (*hydro*), па отуда и њен назив. Представља конвенционалан обновљиви извор енергије, који се вековима користи за добијање механичке, а већ дуже од сто година и електричне енергије.

У старим воденицама за млевење брашна, енергија воде која се креће је преношена на воденичко коло, које се окретало и преко осовине преносило кретање на млински камен, који је дробило зрневље у брашно.

Сличан директан механички пренос је коришћен за пилане и разне друге потребе. Предност директних метода је била једноставност, поузданост и практично „бесплатна“ енергија уз врло мало приметног утицаја на околину.

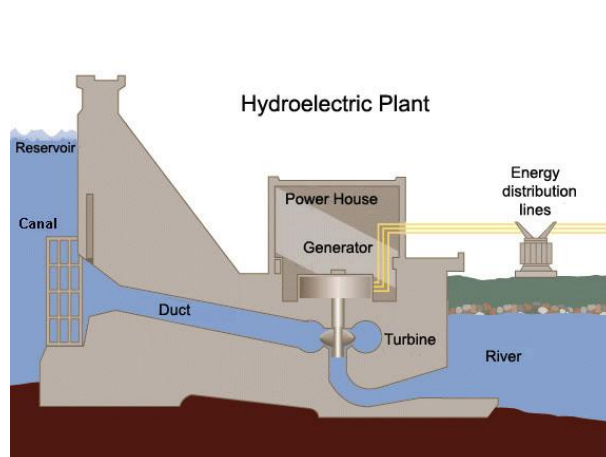
После открића електричног генератора у 19. веку, почеле су да се граде све веће хидроелектране, где се механичка енергија воде претвара у електричну у генератору. Једна од првих која је производила наизменичну струју, са учешћем Николе Тесле, је подигнута на Нијагариним водопадима (САД и Канада). Предност овога је да се енергија преко жица може пренети на велике удаљености. Раније фабрике су често морале да буду на обалама река да искористе директну хидроенергију, поготово пре открића парне машине. Парне машине међутим нису биле погодне за мале потрошаче, па је тек појава јефтиног електрицитета из хидроелектрана решила тај проблем.



Слика 2.1 - Воденица у Немачкој, Аргеништајн [4]

2.1 Хидроелектране

Хидроелектране или хидроелектричне централе су електране које помоћу водних турбина претварају потенцијалну енергију воде у кинетичку и механичку, која се даље користи за обртање електричног генератора. Турбина се састоји углавном од једног проводног дела који води даје довољно велику брзину и преко једног обртног точка одузима енергију од воде.



Слика 2.1.1 - Шема хидроелектране [5]

2.2 Мале хидроелектране

2.2.1 Дефиниција МХЕ

Постоје многе дефиниције малих хидроелектрана, и није могуће прецизно их дефинисати јер је овај концепт донекле субјективан. [6] У различитим државама, горња граница варира између 1,5 и 50 MW.

Генерално, хидроелектране су постројења у којима се потенцијална и кинетичка енергија воде преко турбине, генератора и осталих делова претвара у електричну енергију.

Неке земље попут Португалије, Шпаније, Ирске, Грчке и Белгије су прихватиле 10 MW као горњу границу инсталиране снаге за мале хидроелектране. У Италији је граница 3 MW, у Шведској 1.5 MW, у Француској 8 MW, у Кини 25 MW, а у Индији 15 MW.

Међутим, у Европи се све више прихвата граница од 10 MW коју су усвојиле ESHA (The European Small-Hydropower Association), Европска комисија (European Commission) и UNIPED (International Union of Producers and Distributors of Electricity). У категоризацији малих хидроелектрана (МХЕ), израз "мини" обично се односи на системе капацитета испод 1 MW, "микро" испод 100 kW и "пико" испод 5 kW. У Србији према законској регулативи граница је 10 MW.[7]

2.2.2 Основни облици извођења МХЕ

Мале хидроелектране се све више користе широм света за добијање електричне енергије. Оне морају бити пројектоване и изведене тако да искоришћавају

хидропотенцијал малих водотокова на оптималан начин. Економски исплатива решења су базирана на новим технологијама које омогућавају висок степен искоришћења енергије и техникама које пружају максималну заштиту животне средине.

Према величини напора разликују се три категорије идејних решења:

- високи напор: 100 m и изнад,
- средњи напор: 30 – 100 m,
- ниски напор: 2 – 30 m.

Према повезаности са мрежом и начином рада:

- изоловане електране – самостални рад,
- електране везане на мрежу – паралелни рад,
- електране које раде под режимом: on – off,
- електране у којима ради једна, две или више јединица,
- електране које раде по потреби, у зависности од потрошње.

У зависности од извођења мале хидроелектране се могу поделити на три основне групе:

- проточне мале хидроелектране или „run – off – river“,
- мале хидроелектране са резервоаром (Hydroelectric Dam),
- високо и средње притисне (средњи и високи напор) или деривацијске. [7]

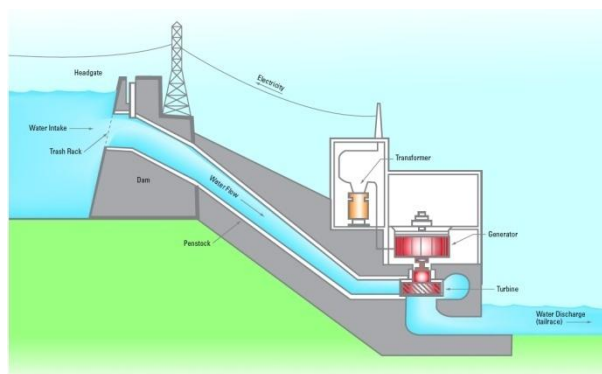
- Проточна МХЕ

Проточна мала хидроелектрана израђује се без складиштења воде (односно без резервоара). Овакав начин извођења хидроелектране има малу висинску разлику испред и иза места захватања воде тако да не користи потенцијалну енергију разлике нивоа већ само кинетичку енергију коју поседује водени ток. Стога је снага овакве електране зависна од тренутне количине воде која се налази у природном току. Овакви типови хидроелектрана у суштини не дају довољно снаге, па се сходно томе користе за снабдевање изолованих подручја или индустрије уколико је њихов минималан 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 захвата и машинске зграде.

- Акумулациона МХЕ

Један од начина за извођење мале хидроелектране са резервоаром јесте акумулациона хидроелектрана (Hydroelectric Dam), као на слици 2.2.2.1, која се прави преграђивањем реке и заустављањем тока, што води стварању великог акумулационог језера узводно од бране која садржи велике количине воде, што представља резервоар енергије, али се може користити и у друге сврхе (наводњавање, риболов итд).

Употребљавају се уколико постоји захтев да се обезбеди у сваком тренутку потребна снага. Код овакве врсте електране обично постоје велике годишње варијације у количини дотока воде. Акумулационо језеро поседује потенцијалну енергију која је резултат висинске разлике горње коте језера и тачке монтаже генератора, а која се претвара у кинетичку енергију воде која покреће лопатице турбине. Вода се од бране води тунелима који могу бити километрима дуги до места где је саграђено постројење електране са турбинама и генераторима. Стварање нових акумулација за мале хидроелектране обично није финансијски исплативо, осим евентуално на изолованим и удаљеним местима где вредност енергије има веома високу цену. Преграђивање или скретања природних речних токова могу се негативно одразити на животну средину, па у овом случају добро решење би представљало неко природно језеро чију енергија би се могла искористити за производњу електричне енергије чиме се не би нарушио природни еко систем тог подручја. [7]



Слика 2.2.2.1 – Акумулациона мала хидроелектрана [8]

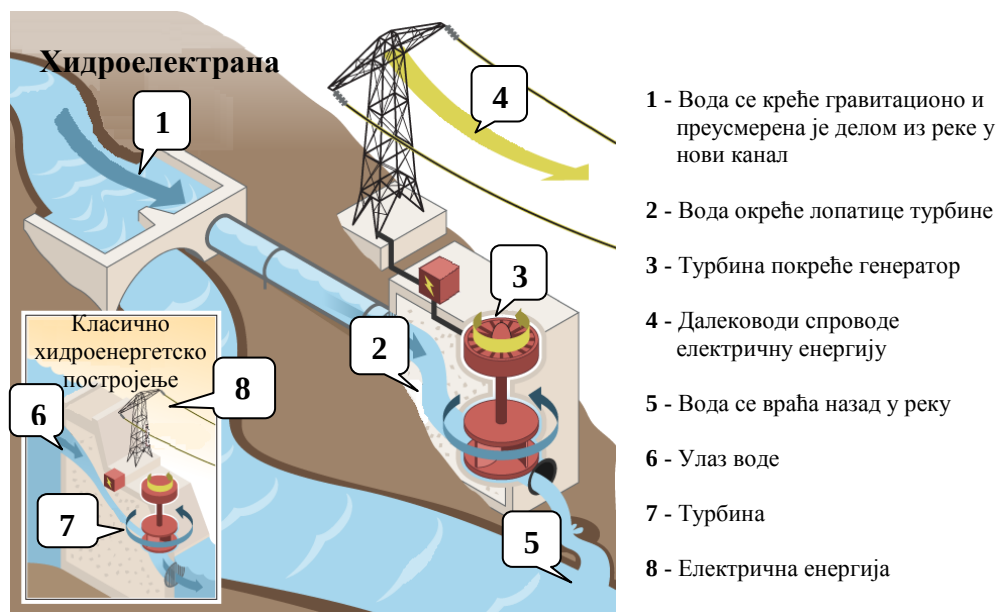
Други тип малих хидроелектрана са резервоаром представља реверзибилна хидроелектрана (Pumped-storage Plants) која је приказана на слици 2.2.2.2. Она је слична по конструкцији акумулационој хидроелектрани, али има велике пумпе које у време мање потрошње струје враћају воду у акумулационо језеро, док у време несташице енергије пуштају воду из акумулације и производе струју у ситуацији када је потребнија и скупља. Енергија која је потребна за пумпање воде мора бити генерисана од стране неких других извора. Овакве хидроелектране служе уравнотежењу производње и потрошње у електричној мрежи. [7]



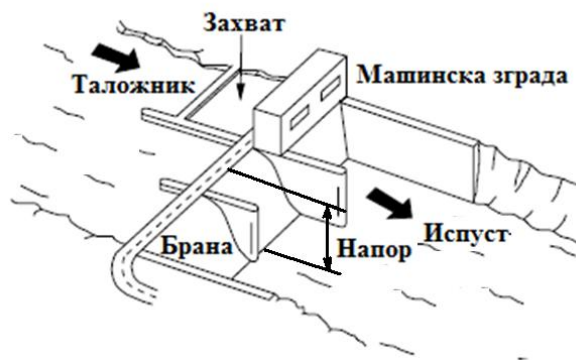
Слика 2.2.2.2 - Шема реверзибилне хидроелектране [9]

- Деривацијска МХЕ

Деривацијска хидроелектрана је врста хидроелектране код које се машинска зграда за производњу електричне енергије налази измештена на некој удаљености (низводно од бране), а вода се доводи посебним цевима са захвата до машинске зграде. На слици 2.2.2.3. приказана је једна деривациона хидроелектрана, а на слици 2.2.2.4. приказана је шема хидроелектране са машинском зградом у самој брани. [7]



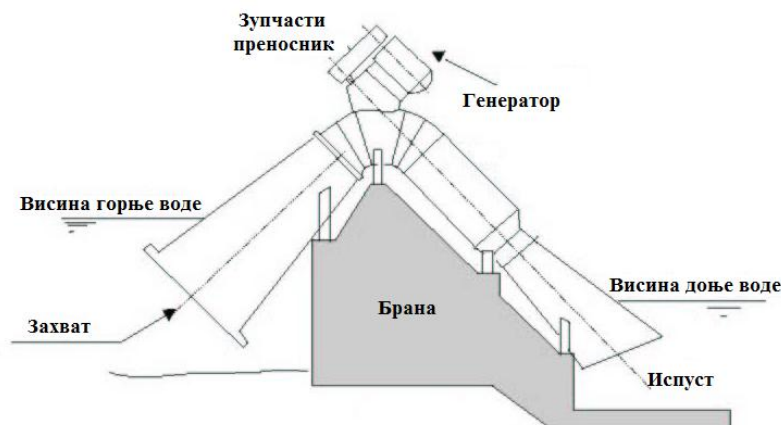
Слика 2.2.2.3 – Деривацијска мала хидроелектрана [10]



Слика 2.2.2.4 - Шема хидроелектране са машинском зградом на самој брани

- Нископритисне са сифонским одводом

У случају да брана није превисока може се уградити сифонски довод (слика 6). Интегрални сифонски довод омогућава елегантно извођење постројења, најчешће до висине 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). [7]



Слика 2.2.2.5 - Нископритисна хидроелектрана са сифонским доводом

- МХЕ интегрисане у канал за наводњавање

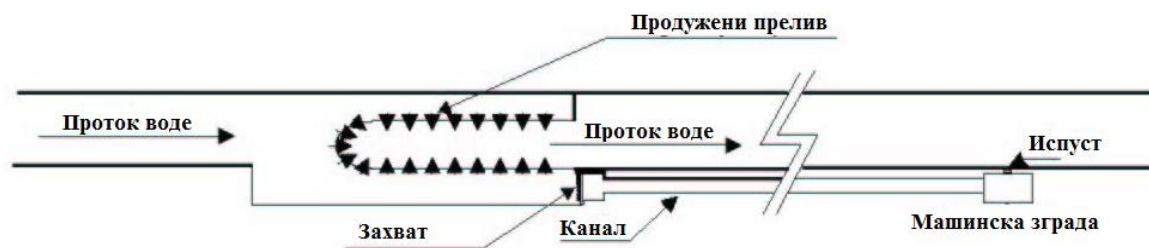
Постоје два начина извођења малих хидроелектрана које користе канал за наводњавање:

Ако је канал довољно велики за смештај захвата, машинске зграде, одвода и бочног обилазног вода, да би се осигурало снабдевање водом за наводњавање извођење мора да садржи бочни обилазни вод у случају искључења турбине. Овакав начин израде захтева пројектовање хидроелектране истовремено када и пројектовање канала за наводњавање, јер би уграђивање у канал који је већ у функцији могло да буде врло скупо решење.



Слика 2.2.2.6. - Истовремено пројектовање канала и система

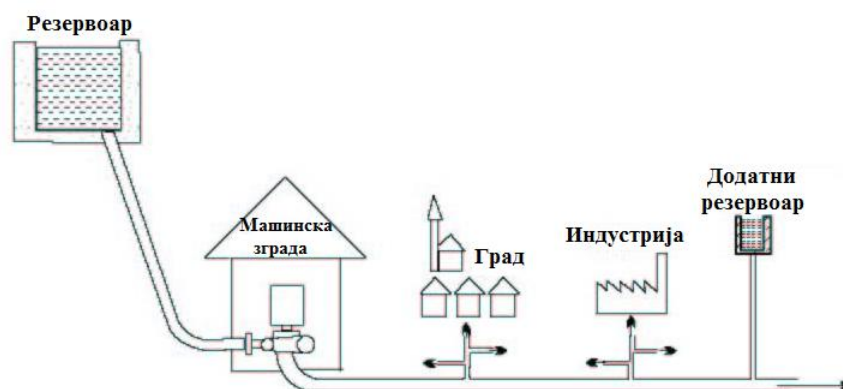
Уколико канал већ постоји, као на слици 8., онда би тај канал требало незнатно повећати за смештај захвата и прелива. Како би се сама ширина захвата смањила на минималну вредност најбоље је уградити издужени прелив. Од захвата се вода кроз притисни цевовод доводи до турбине, а затим се кроз кратки испуст враћа у канал. [7]



Слика 2.2.2.7. - Уградња система у већ изграђен канал

- МХЕ уграђена у систем за водоснабдевање

Вода за пиће се испоручује у град транспортом воде из повишеног резервоара кроз цевовод под притиском. Уобичајено, код таквих постројења, дисипација енергије на нижем крају цевовода, на уласку у постројење за прочишћавање воде, се ублажава коришћењем специјалних вентила. Смештање турбине на крај цевовода, да претвори ионако изгуљену енергију у електричну, згодна је опција, под условом да се избегне хидраулични удар. Да би се осигурало трајно снабдевање водом мора бити уграђен систем обилазних вентила. У неким водоснабдевним системима 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. На наредној слици 2.2.2.8 је приказана једна МХЕ уграђена у систем за водоснабдевање.



Слика 2.2.2.8 - МХЕ уграђена у систем за водоснабдевање

2.2.3 Предности и мане МХЕ

Утицаји на животну средину који су везани за развој малих хидроелектрана могу значајно да варирају у зависности од локације и конфигурације терена. Мале хидроелектране доприносе одрживом развоју друштва, јер су економски изводљиве, еколошки прихватљиве (при производњи електричне енергије нема емисије штетних гасова стаклене баште) и обезбеђују децентрализовану производњу и развој удаљених заједница.

Предности коришћења малих хидроелектрана су следеће:

- ради се о чистом и обновљивом извору енергије, јер за погон користе воду, која се у процесу производње електричне енергије не троши,
- у поређењу са великим хидроелектранама 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 се инвестициона улагања за електрификацију удаљених насеља од опште електричне мреже, а електрификацијом таквих руралних насеља доприноси се унапређењу њиховог развоја,
- пошто су најчешће лоциране близу корисника, губици електричне енергије у преносу се смањују и растерећује се електро мрежа,
- доприносе отварању нових радних места за надгледање функционисања електране,
- експлоатишу се уз релативно ниске трошкове,
- радни век је врло дуг, у просеку 30 година, мада постоје МХЕ које раде и 80 и више година.

Што се тиче мана које се односе на коришћење малих хидроелектрана, неке од њих су:

- потреба обезбеђења биолошког минимума (резервног тока),
- потребна је 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 представља несталан проток који се огледа у варијацији тока, као и мала акумулација, компликована изградња и релативно високи инвестициони трошкови. [7]

3.0 Река Ибар и њен слив

Ибар је река у јужном делу Србије и источном делу Црне Горе, укупне дужине 276 km. Површина слива износи 8.059 km², а припада Црноморском сливу. Извире јаким врелом испод планине Хајла у источној Црној Гори, 10 km узводно од Рожаја, а тече источно до Косовске Митровице на Косову. На 24 km узводно од Косовске Митровице на Ибру је изграђена брана висине 110 m, која је направила вештачко језеро Газиводе. У Косовској Митровици се у Ибар улива река Ситница, и одатле се Ибар окреће на север. Одатле Ибар иде углавном уским клисурама са изузетком нешто ширих котлина у околини Звечана, Лепосавића, Рашке и Баљевца. На овом месту је

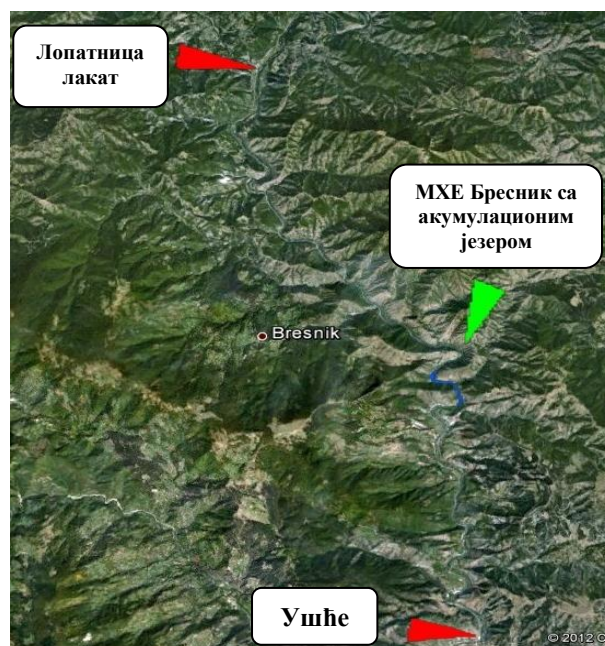
Ибар ископао природни пут између Косовске низије и остатка Србије. Ту пролази железничка пруга као и магистрала која је по овој реци и добила име. Ибар се код Краљева улива у Западну Мораву и њена је највећа притока. Важније притоке Ибра су: Рашка и Студеница са леве, а Ситница и Јошаница са десне стране. Већа насеља кроз која Ибар протиче су: Рожаје, Рибариће, Зубин Поток, Косовска Митровица, Звечан, Лепосавић, Рашка, Бањевац, Ушће, Богутовац, Матарушка Бања и Краљево. [11]



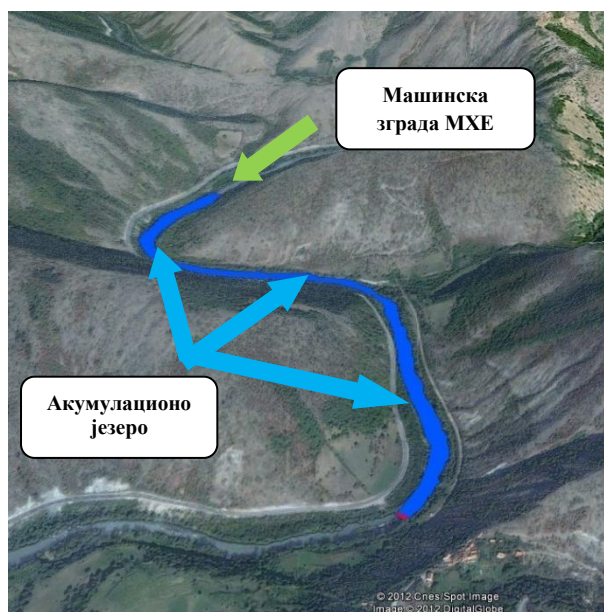
Слика 3.1 - Мост на реци Ибар у Матарушкој Бањи [12]

3.1 Подручје за изградњу мале хидроелектране

Мала хидроелектрана Бресник са својом акумулацијом се планира на подручју између две извештајне хидролошке станице Лопатница Лакат и Ушће на реци Ибар. Мала хидроелектрана са акумулационим језером се налази у близини села Бресник, недалеко од Краљева у централном делу Србије у подножју планине Чемерно, недалеко од манастира Студенице који има 184 становника.



Слика 3.1.1 – Подручје за изградњу МХЕ на реци Ибар код села Бресник



Слика 3.1.2 – Подручје за акумулацију МХЕ код села Бресник

4.0 Мала хидроелектрана Бресник

4.1 Основне карактеристике МХЕ Бресник

Микролокација МХЕ Бресник се налази на око 11 km узводно од извештајне хидролошке станице Лопатница Лакат. Преградно место се налази на око 2 km од села Бресник где се предвиђа преливна бетонска брана грађевинске висине 13 m и дужине 80 m са машинском зградом у телу саме бране. Иза бране би се формирала акумулација дужине 2 km која би потопила терен који је ненасељен и нема обрадивог земљишта. Велике воде ће се пропуштати кроз 2 темељна испуста који се налазе у телу бране и слободним преливањем преко круне бране.

Земљиште на коме се планира изградња МХЕ Бресник је претежно општинско и водoprивредно, а само један мањи део је у приватном власништву. До преградног места, односно бране, потребно је направити силазну рампу са асфалтног пута.

Осим за производњу електричне енергије ова акумулација се може користити за наводњавање, као и у спортско-рекреативне сврхе.

Машинска зграда се налази са леве стране реке у близини магистралног пута. У машинској згради се могу инсталирати три типа турбина: Каплан, Булб (капсулна турбина) и Пит (цевна) турбина. Сва три наведена типа турбина одликује висок степен ефикасности у широком опсегу протока.

Табела 4.1.1 - Општи технички подаци за МХЕ Бресник

Водоток	Ибар
Максимална висина бране	9 m
Кота горњег нивоа воде	306 mm
Кота доњег нивоа воде	297 mm
Средњи максимални годишњи проток	145.35 m ³ /s
Средњи годишњи проток	59.2 m ³ /s
Минимални годишњи проток	8.16 m ³ /s
Инсталисани проток	109 m ³ /s
Бруто пад	9 m
Инсталисани пад	8,50 m
Инсталисана снага	7745 kW
Број и тип турбина	4, Каплан
Просечна годишња производња електричне енергије	око 33.613·10 ⁶ kWh

4.2 Основне хидролошке карактеристике реке Ибар у профилу МХЕ Бресник

МХЕ Бресник на Ибру планира се на око 11 km узводно од извештајне хидролошке станице Лопатница Лакат. Основне хидрографске карактеристике реке Ибар до профила МХЕ Бресник и водомерних станица Лопатница Лакат и Ушће дате су у табели 4.2.1.

Табела 4.2.1 – Морфолошке карактеристике слива до разматраних профила

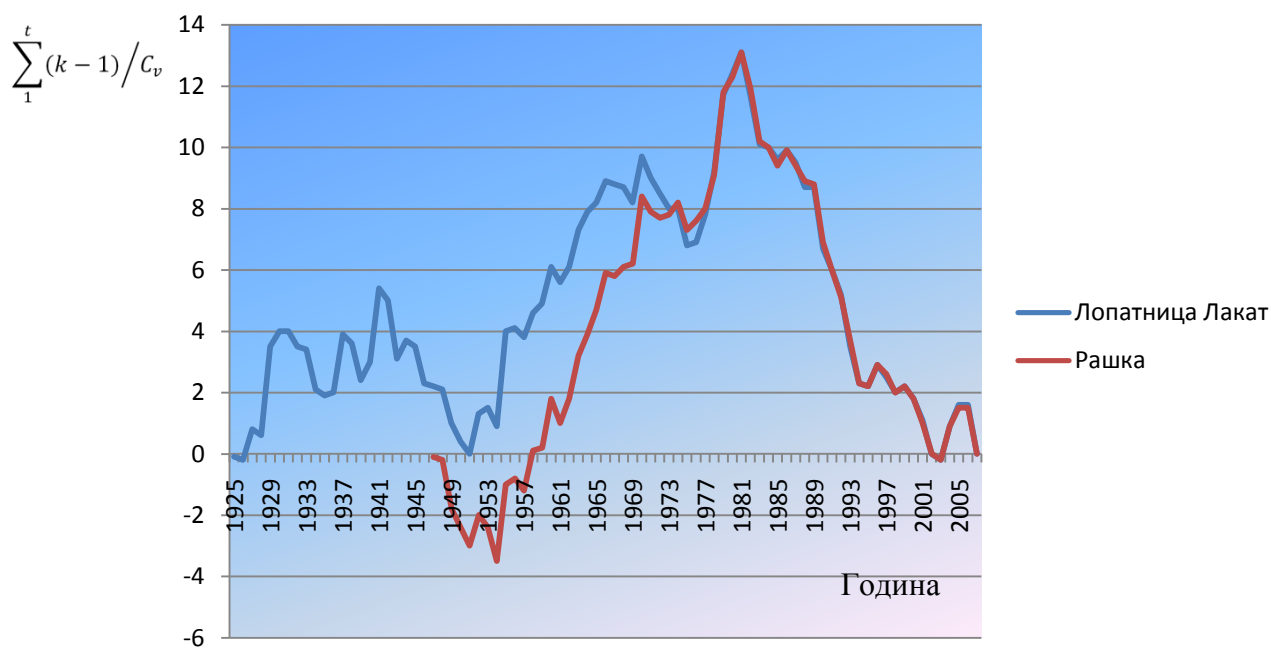
Редни број	Река	Профил	Повр. слива [km ²]	Дуж. тока [km]	Уравнати пад тока I _{ur} [‰]	Пад слива J _{sl} [‰]	Средња над. висина H _{sr} [mm]
1	Ибар	Вод. ст. Лопатница Лакат	2528	128.1	4.05	296	1199
2	Ибар	МХЕ Бресник	2297	117.2	4.52	305	1222
3	Ибар	Вод. ст. Ушће	2209	110.7	4.73	308	1232

За дефинисање рачунских хидролошких карактеристика у профилу хидроелектране Бресник на реци Ибар коришћени су подаци о дневним и карактеристичним протоцима на водомерним станицама Лопатница Лакат и Ушће. Водомерна станица Лопатница Лакат почела је са радом 1925. године и до данас има непрекидни низ осматрања. Станица Ушће основана је знатно касније - 1961. године и има непрекидни низ осматрања до данас.

4.3 Дефинисање меродавних средњих вода и расподеле протока по месецима унутар године

С обзиром на дужине расположивих низова о протоцима на хидролошким станицама Лопатница лакат и Рашка сагледана је репрезентативност низова, односно дефинисане су меродавне дужине периода за оцену просечне вишегодишње вредности протока на овим станицама. У том циљу, извршена је анализа цикличности средње годишњих протока под чиме се подразумевала анализа законитости смењивања влажних и сушних година, при чему један циклус обухвата један влажан и један сушан период. Као меродавни период за оцену просечних вишегодишњих вредности протока усваја се онај временски период са два или више циклуса. За испитивање цикличности серија средње годишњих протока на реци Ибар коришћена је метода интегралних кривих модуларних одступања средњих годишњих протока:

$$\sum_1^t (k - 1) / C_v = f(t)$$



Слика 4.3.1 – Интегралне криве одступања од средњих годишњих протока

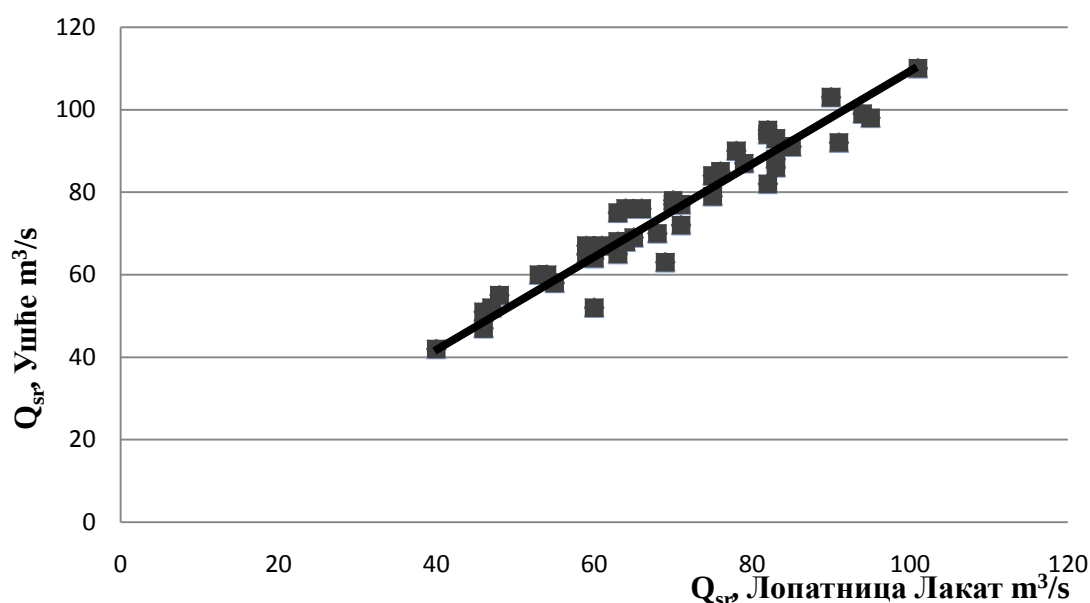
На слици 4.3.1 приказане су ове криве за хидролошку станицу Лопатница Лакат која има низ осматрања од 83 године и за хидролошку станицу Рашка која има низ осматрања од 57 година.

На основу ове криве могу се дефинисати два пуна циклуса промене водности и то од 1925. -1951. и од 1952. - 2002, чија је водност ових периода блиска, скоро иста, као средња вишегодишња водност реке Ибар у профилу извештајне хидролошке станице Лопатница Лакат ($Q_{sr}=62.4,0 \text{ m}^3/\text{s}$).

Самим тим, сваки од ових периода или обједињени у један дужи низ могу бити усвојени као рачунски периоди за одређивање средње вишегодишње вредности.

Интегрална крива годишњих протока реке Ибар у профилу извештајне станице Лопатница Лакат искоришћена је за оцену водности и на хидролошкој станици Рашка која има краћи низ осматрања. За ту сврху, на истом дијаграму конструисана је и интегрална крива годишњих протока и на хидролошкој станици Рашка, одакле се види синхроност колебања годишњег протока у оба профила што даје основу да профил Лопатница Лакат може бити аналогни профил како хидролошкој станици Рашка тако и хидролошкој станици Ушће.

На слици 4.3.2 показана је веома добра зависност годишњег протока на ова два профила из које се види могућност коришћења принципа аналогности за станицу Ушће.



Слика 4.3.2 – Зависност средње годишњих протока на реци Ибар у профилу Ушћа и Лопатнице лакат

Средња вишегодишња вредност за изабрани репрезентативни период (1952. - 2002.) за хидролошку станицу Лопатница Лакат износи:

$$Q = 62.4 \text{ m}^3/\text{s}$$

Средње месечни и годишњи протоци код водомерне станице Ушће попуњени су за недостајући период од 1952. - 1960. године. За ту сврху изабрана су аналогна осматрања на водомерним станицама Лопатница Лакат и Рашка. Користећи податке о средње месечним протоцима на овим станицама у заједничком периоду осматрања на овим станицама (1961. – 2002.) формиран је модел вишеструке линеарне корелације:

$$Q_{sr.mes}^{Ušće} = a_1 \cdot Q_{sr.mes}^{Lopatnica} + a_2 \cdot Q_{sr.mes}^{Raška} + a_0$$

где су a_1 , a_2 и a_0 регресиони коефицијенти.

$$a_1=0.59$$

$$a_2=0.375$$

$$a_0=1.035$$

Користећи овај модел, попуњени су подаци о средње месечним протоцима на водомерној станици Ушће за период 1952. - 1960. Овако дефинисани протоци систематски смањују амплитуду колебања у односу на осмотрене протоке. Систематско смањење дисперсије узето је у обзир допунским прорачуном вредности по изразу:

$$Q_i^* = \left(\frac{Q_i - \bar{Q}_n}{R} \right) + \bar{Q}_n$$

где су:

Q_i – вредности срачунате по моделу

$\bar{Q}_n$ – средња вредност за истовремени период осматрања

R – коефицијент вишеструке корелације ($R^2=0.982$).

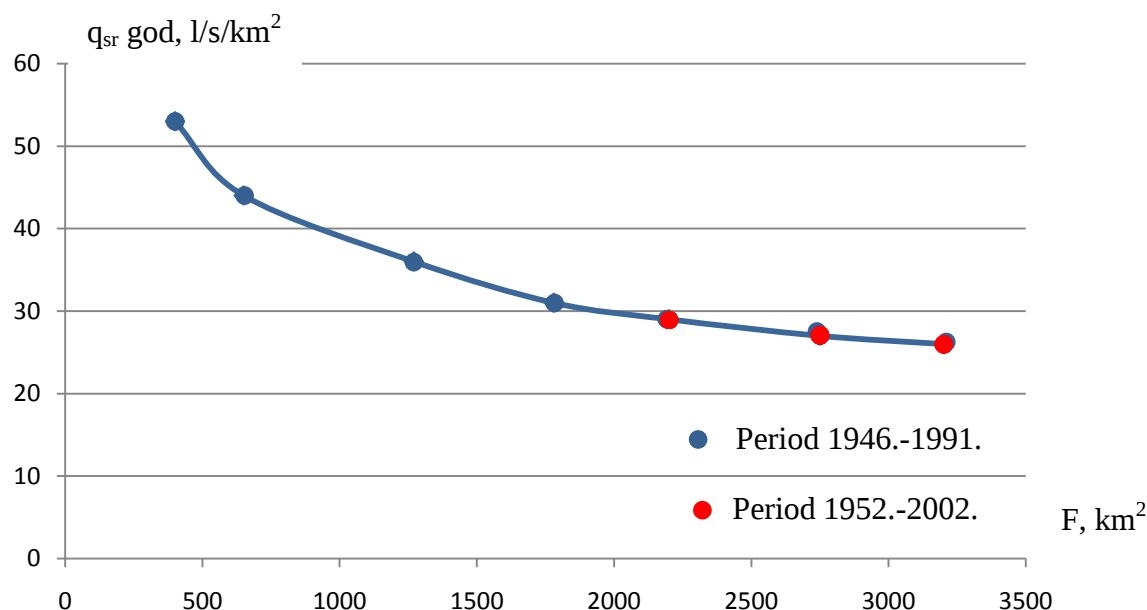
На основу овако установљеног низа Q_i^* , заједно са осмотреним низом, извршен је прорачун основних статистичких параметара на овој, као и на осталим станицама, за усвојени, репрезентативни период 1952. - 2002.

Табела 4.3.1 – Основне карактеристике средњих вишегодишњих протока на водомерним станицама Лопатница Лакат, Ушће и Рашка на Ибру

Водомерна станица	Период осматрања	У периоду осматрања		Репрезентативни период 1952-2002	
		Q_{sr} (m^3/s)	C_v	Q_{sr} (m^3/s)	C_v
Лопатница Лакат	1925-2007	62.4	0.212	62.4	0.211
Ушће	1961-2007	56.4	0.208	58	0.210
Рашка	1947-2003	50.96	0.206	51.6	0.209

На основу података из табеле 4.3.1 и података о просечним вишегодишњим протоцима на водомерним станицама на Ибру (Лопатница лакат, Ушће и Рашка) преузетих из Водопривредне основе Србије (период 1946. -1991.) конструисане су зависности модула специфичног отицаја од површине слива $q_{sr}=f(F)$.

$$q_{sr}=f(H_{sr}/\sqrt{F})$$



Слика 4.3.3 – Зависност специфичног модула отицаја од површине у сливу реке Ибар

На овај дијаграм нанете су и вредности са станица Лопатница Лакат, Ушће и Рашка за рачунски период 1952. - 2002. године. Из ових зависности се види веома добра законитост промене специфичног модула отицаја са порастом површине слива, што пружа могућност оцене средњег вишегодишњег протока у профилу МХЕ Бресник. Он износи:

$$Q_{sr.god}^{Bresnik} = 59.2 \text{ m}^3/\text{s}$$

Одређивање средње месечних модула отицаја $q_{sr.mes.} \frac{Q}{F} 1000, l/s/km^2$, односно средње месечних протока $Q_{sr.mes.}$, у профилу МХЕ Бресник, обзиром на положај хидролошких профила, вршен је линеарном интерполацијом модула отицаја између водомерних станица користећи израз:

$$q_x = q_{uzv.} \frac{F_{uzv.}}{F_x} + \left(q_{niz.} \frac{F_{niz.}}{F_x} - q_{uzv.} \frac{F_{uzv.}}{F_x} \right) \frac{F_x - F_{uzv.}}{F_{niz.} - F_{uzv.}}, l/s/km^2$$

где су F_x , $F_{uzv.}$ и $F_{niz.}$ површине сливова до профила МХЕ, односно узводне и низводне станице. q_x су одговарајући модули отицаја у профилу МХЕ.

Овај израз је примењив ако је $\frac{F_{niz.} - F_{uzv.}}{F_{uzv.}}$ величине од 15-20%.

Користећи израз и податке о средње месечним протоцима са узводне водомерне станице Ушће и низводне водомерне станице Лопатница Лакат одређене су серије средње месечних протока у профилу МХЕ Бресник.

Табела 4.3.2 – Средње месечни протоци на реци Ибар у профилу МХЕ Бресник

Год.	Q _{sr.mes} p% m ³ /s												Q _{sr.god.} m ³ /s
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1952	56.56	54.4	61.84	122.16	74.08	54.08	24	11.76	20.88	73.44	112.4	219.68	73.84
1953	103.92	73.52	55.68	121.84	129.12	92.32	42.08	21.84	17.76	14.96	12.72	10.88	58
1954	10.16	11.68	87.52	75.76	140.32	62.8	25.6	15.04	13.92	39.28	65.6	75.28	52
1955	86.88	157.36	102.64	94.48	85.68	43.84	48	42.88	67.12	166	152.32	133.44	98.24
1956	88.4	52.72	71.68	154.64	153.52	70.16	28.88	13.6	10.56	10.96	44.16	42	61.76
1957	19.12	94.32	64.8	74.56	109.2	57.6	24.4	14.24	17.28	50.56	38	76.08	53.28
1958	59.04	60.96	93.68	174.48	192.32	82.72	30.72	14.96	11.44	13.68	50.08	73.52	71.44
1959	78.32	33.2	72.56	67.76	75.28	68.8	60.48	40.48	53.2	20.8	78.4	101.76	62.64
1960	64	143.04	81.12	94.56	133.44	77.2	37.04	16.4	11.6	48.64	135.84	97.68	78.24
1961	52.64	32.4	63.04	79.76	128.56	56	27.92	14.48	9.52	13.2	55.04	48.56	48.56
1962	45.36	53.6	134.08	159.44	164.08	63.04	33.04	17.6	11.2	15.84	64	69.28	69.28
1963	141.84	114.48	92.8	123.84	124.72	81.68	37.12	18.4	15.44	14.32	22.4	123.04	75.68
1964	41.04	35.68	73.12	84.4	93.12	81.52	48.32	29.76	24.88	82	86.88	132.08	67.92
1965	69.76	52	107.12	119.04	167.2	103.2	37.84	17.68	16.4	10.64	30.4	77.28	67.52
1966	60.56	118.08	71.36	108.88	117.76	91.28	38.96	18.24	14.8	34	102.72	97.44	72.4
1967	45.28	36.72	79.6	154.64	146.24	66.32	60.32	23.2	15.76	13.68	13.28	37.6	57.84
1968	66.08	75.76	80.88	111.52	88.64	54.08	19.76	18.32	27.44	19.6	60.88	93.6	59.6
1969	45.6	66.4	64.8	83.92	122.32	57.12	33.12	20.96	27.44	17.2	33.12	75.68	53.92
1970	140.4	79.28	103.84	207.04	136	96.56	47.68	19.12	16.8	30.88	59.84	44.24	81.68
1971	97.76	43.2	62.8	103.6	103.28	45.12	22.4	17.76	23.76	23.12	41.12	54.4	53.28
1972	28.56	33.6	39.68	60.32	59.36	34.48	54.96	29.04	69.76	89.68	87.36	54.4	53.44
1973	36.24	44.72	43.84	117.68	141.2	46.64	31.92	22.8	23.84	36.72	54.72	70.88	56
1974	50.48	49.2	40.88	57.04	115.92	71.12	33.76	16.08	19.84	149.12	96.08	69.92	64.24
1975	33.52	23.44	52.56	97.84	78.56	49.92	28.24	15.92	13.84	47.44	69.12	44.4	46.32
1976	22.08	24.96	53.84	119.12	111.36	90	38.08	34.88	25.76	23.44	65.84	115.2	60.4
1977	80.64	140	92.4	148.16	93.36	52.8	22.72	20.16	26	35.68	50.48	64	68.32
1978	56.72	116.32	118.08	110.16	176.64	104.16	36.08	14.88	41.28	44	14.88	66.48	74.72
1979	116.96	132.08	61.76	119.36	126.16	84.32	44.4	37.44	30.24	48.48	220.96	80.4	91.28
1980	62.96	65.44	61.52	79.92	125.36	86.4	32.56	17.68	13.04	70.72	126.72	81.44	68.56
1981	38.4	44.64	161.68	129.2	112.08	60.16	26.32	17.68	19.04	35.28	36.48	140.72	68.72
1982	67.84	22.56	32.32	118.16	89.28	50.56	19.28	12.4	9.04	13.36	13.44	30.08	40
1983	18.32	45.12	60.56	93.2	61.12	46.16	28.8	14.72	18.32	12.08	14.4	49.44	38.4
1984	69.04	48.24	67.6	113.12	162.16	58.8	20.64	13.84	22.4	28.48	26.72	18.56	54.16
1985	30.64	56.08	59.04	111.52	106.88	36.72	16.88	11.28	10.16	8.56	95.28	49.84	49.2
1986	114.88	117.2	108.72	106.72	110.56	98.24	50.16	20.56	12	13.76	14	12.32	64.56
1987	46.8	59.04	37.84	102.72	117.28	78.88	26.8	15.28	11.2	11.44	30.72	64.56	50.08
1988	26.32	62.08	71.6	111.92	90.32	45.2	20.16	13.04	18.24	16.16	34.4	75.28	48.56
1989	19.52	34.24	87.28	78.08	92.72	68.32	39.12	27.04	32.96	71.6	55.92	67.28	56.32
1990	31.36	28.56	34.08	88.96	58.64	31.28	15.04	10.96	10.4	11.92	29.44	46.32	33.04
1991	25.2	34.4	60.08	55.12	97.28	87.12	41.36	20.88	12.64	22.32	98	36.72	49.2
1992	19.84	18	42.4	98.24	64	52.8	25.52	12.64	10.56	52.08	90.08	40.64	44.72
1993	21.36	16.32	30.64	105.84	55.12	21.04	13.28	10.56	13.84	19.68	43.68	82.88	36.24
1994	50.48	39.52	57.44	141.2	92.16	43.44	35.44	16.24	12.72	13.04	19.6	13.84	44.56
1995	45.84	54.16	59.76	117.36	144	57.04	26.4	21.84	48	23.12	24.88	81.68	58.64
1996	56.64	39.92	56.24	145.84	131.52	44.08	17.12	12.48	52.32	51.68	96.24	121.52	68.8
1997	88.48	33.28	55.68	96	161.2	50.4	19.36	14.48	10	20.08	44.16	52.24	54
1998	33.52	34.16	32.88	109.6	89.84	39.6	17.76	11.12	40.56	72	84.16	63.6	52.4
1999	51.92	46.56	83.68	129.12	130.56	50.08	24.96	15.12	12.8	13.12	43.36	137.76	61.76
2000	59.04	45.36	85.68	174.24	65.68	25.12	14.96	9.28	19.36	16	42.64	66.16	51.84
2001	78.72	59.2	92.8	96.32	92.56	50.64	19.68	11.52	26.88	16	40.32	27.04	50.88
2002	21.2	44.08	51.76	80.96	43.36	22.32	13.6	17.6	30.64	104.8	44.08	44.56	43.2
sr	56.4	58.88	70.96	110.4	111.36	61.6	31.04	18.56	22.48	37.52	60.16	71.68	59.2
S	31.2	35.36	26.72	31.28	34.48	21.36	12	7.52	14.4	34.08	40.96	38.88	13.36
C _v	0.525	0.572	0.357	0.269	0.294	0.329	0.366	0.386	0.608	0.862	0.6646	0.515	0.214

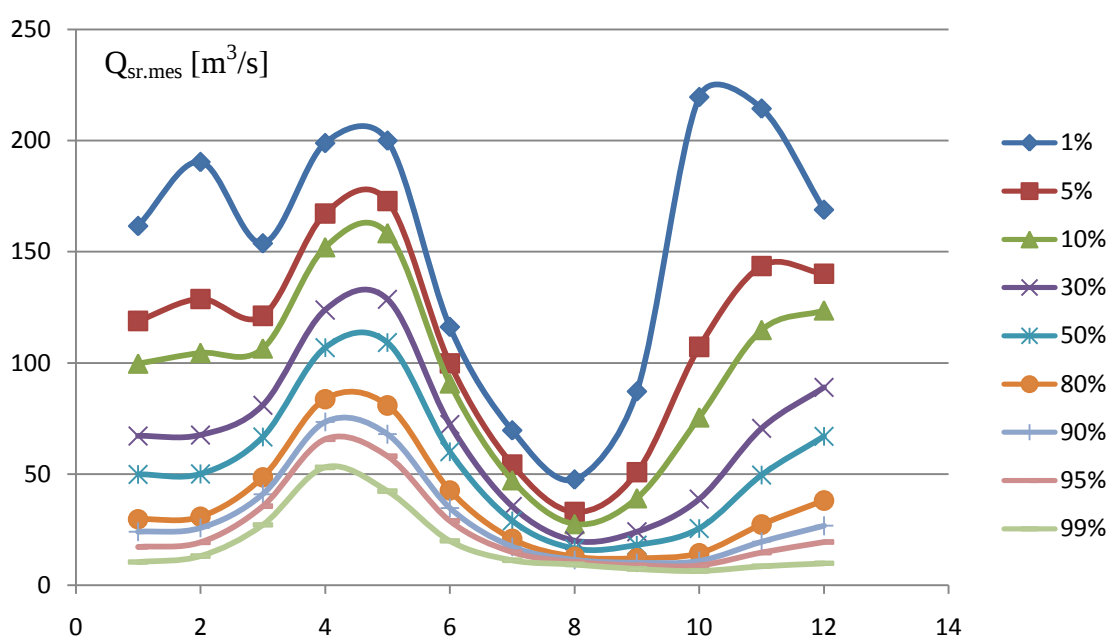
Табела 4.3.3 – Средње месечни и годишњи протоци на реци Ибар у профилу МХЕ Бресник за вишегодишњи рачунски период (1952-2002)

Ознака	Средње месечни протоци у периоду, $Q_{sr.mes}$, m^3/s												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
$Q_{sr.mes}$	56.4	58.8	70.9	110.4	111.3	61.6	31.0	18.5	22.4	37.5	60.1	71.6	59.2

Ове временске серије су убачене у закон расподеле Log Pirson III.

Табела 4.3.4 – Годишња расподела средње месечних протока на Ибру у профилу МХЕ Бресник помоћу Log Pirson III расподеле.

%	$Q_{sr.mes}$, m^3/s												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1	161.6	190.4	153.8	198.9	200	116.2	69.7	47.6	87.2	219.6	214.4	168.9	95.8
5	118.9	128.8	121.2	167.2	172.8	99.8	54.3	33	50.8	107.2	143.6	140.1	83.1
10	99.7	104.5	106.5	152	158.3	90.8	47.3	27.6	39.2	75.52	114.8	123.6	76.9
30	67.2	67.6	81	123.8	128.6	72.3	35.5	20.1	24.1	38.8	70.6	89	65.2
50	49.92	50.1	66.7	106.9	109.2	60.1	29	16.5	18.1	25.6	49.6	67	58
80	29.7	30.8	48.6	83.7	80.9	42.6	20.8	12.8	12.1	14.4	27.3	38.1	47.8
90	24.1	25.8	41	73.4	67.9	34.8	17.4	11.5	10.2	11	19.6	26.8	43.1
95	17.3	19.4	35.6	65.7	58.1	29	15	10.6	9	9	14.8	19.5	39.5
99	10.5	13.2	27.2	53.1	42.4	20	11.3	9.4	7.4	6.5	8.6	9.9	33.4



Слика 4.3.4 – Графички приказ унутар годишње расподеле средње месечних протока у профилу МХЕ Бресник

Из овога се види расподела протока унутар године по месецима како у просечној тако и у годинама са различитом вредношћу. Може се закључити да се велике воде уобичајено јављају у периоду априла и маја док се мале воде обично јављају у августу месецу.

4.4 Дефинисање меродавних малих вода

Када се примени исти принцип аналогности дефинише се и расподела минималних средње месечних протока у профилу МХЕ Бресник,

Табела 4.4.1 – Статичке вредности минималних средње месечних протока на реци Ибар у профилу МХЕ Бресник

Ознака	$Q_{sr,mes,min} \text{ m}^3/\text{s}$									Тип расподеле
	1%	5%	10%	30%	50%	80%	90%	95%	99%	
$Q_{sr,mes,min} \%$	40.6	27	22.4	16.1	13.3	10.5	9.6	9.1	8.4	Лонг Пирсон 3

У складу са прописима Водопривредне основе Србије, као меродавни минимални проток односно биолошки минимум који мора да се остави у реци за потребе одржавања биоценозе, усваја се минимални средње месечни проток од 95% обезбеђености. Према табели 4.4.1 он за профил МХЕ Бресник износи $9.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

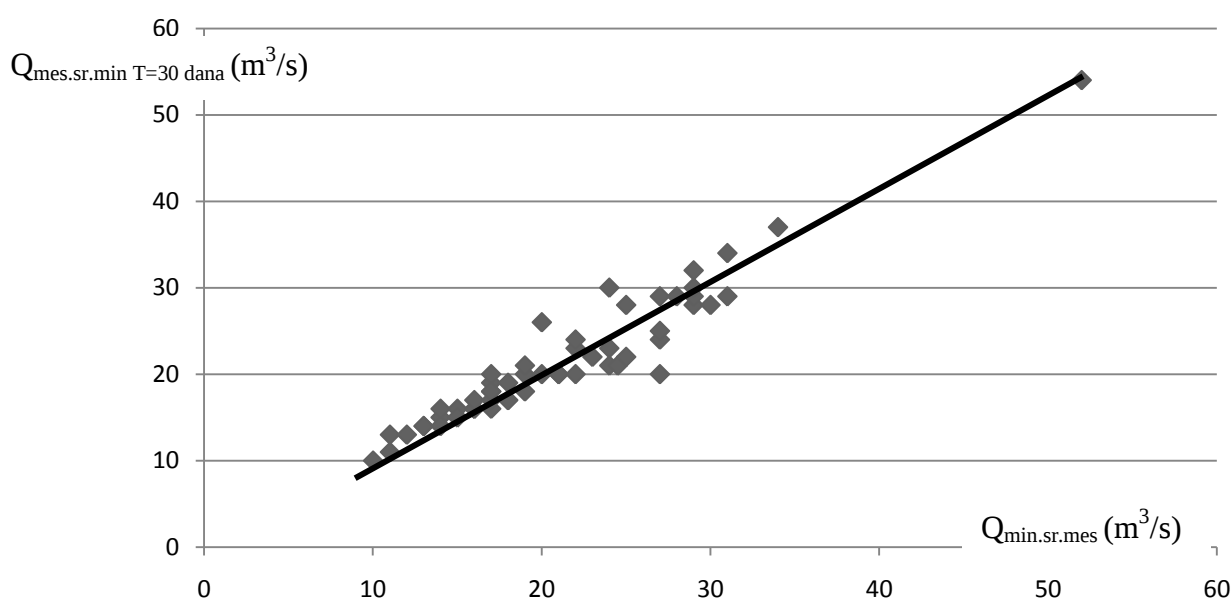
$$Q_{min,biol.} = 9.1 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ако се узима још строжи критеријум као тридесетодневни минимални проток обезбеђености 95% и то на основу зависности да је:

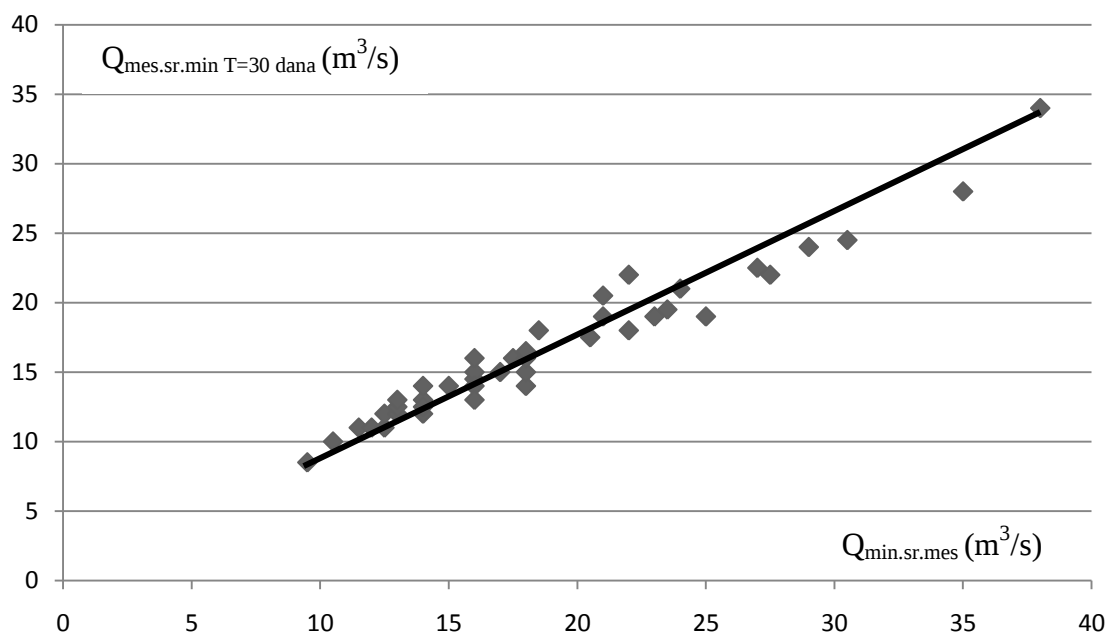
$$Q_{min,sr.T=30 \text{ dana}} = f(Q_{sr,mes,min})$$

установљено је да за реку Ибар за профил водомерне станице Лопатница лакат и Ушће износи:

$$Q_{min,sr.T=30 \text{ dana},p=95\%} = 8.16 \text{ m}^3/\text{s}$$



Слика 4.4.1 – Зависност средње минималних тридесетодневних протока од минималних средње месечних протока на реци Ибар вод. станице Лопатница Лакат



Слика 4.4.2 – Зависност средње минималних тридесетодневних протока од минималних средње месечних протока на реци Ибар на водомерној станици Ушће

4.5 Дефинисање криве трајања дневних протока

Унутар једне године расподела протока може бити представљена не само у виду хронолошког тока протока по месецима или сезонама него и помоћу криве трајања дневних протока која одражава трајање неког протока, или већег од њега, у току одређеног времена. С друге стране, количина воде која се може енергетски искористити зависи од хидролошких карактеристика, дефинисаних кривом трајања протока и величином изградње (инсталисаном снагом хидроелектране). Другим речима, просечна годишња производња електричне енергије се одређује помоћу криве трајања протока, пада, коефицијента корисног дејства и инсталисане снаге. Иако крива трајања не даје временски распоред протока, као што даје хидрограм, она ипак, осим информација за процену хидропотенцијала, пружа и базну информацију о потреби градње акумулације.

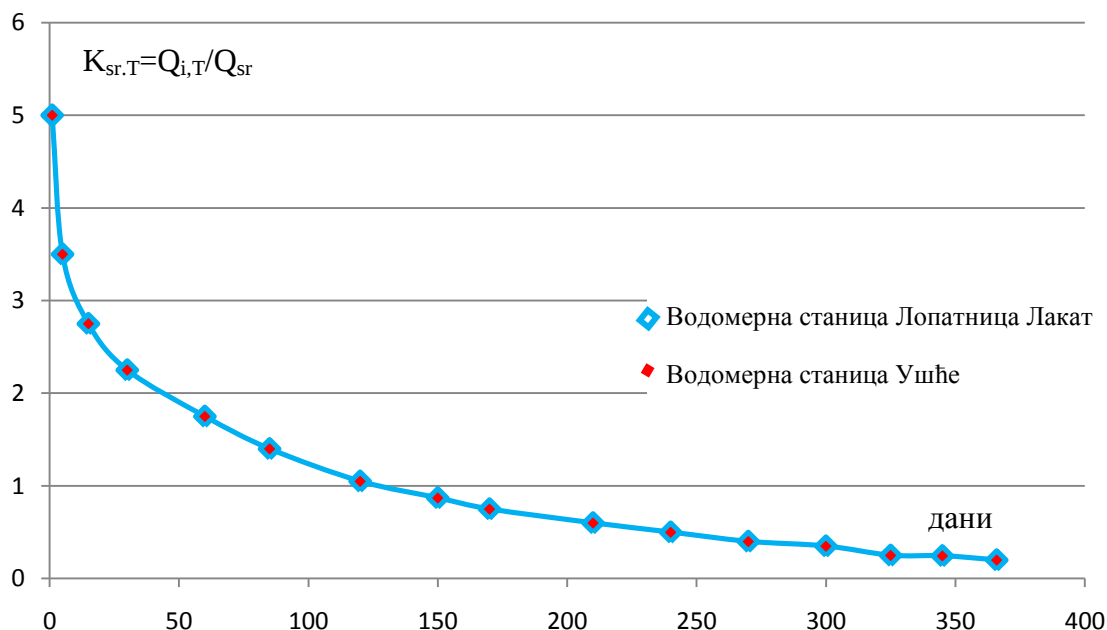
Имајући у обзир да у профилу МХЕ Бресник не постоји регуларна хидролошка станица која врши осматрање водостаја и мерење протока, то су за дефинисање криве трајања дневних протока воде коришћени подаци са низводне и узводне водомерне станице Лопатница Лакат, односно Ушће. На основу података са ових станица одређене су криве трајања дневних протока за сваку годину, чиме је формирана матрица:

$$\begin{array}{ccccccc}
 Q_{1,1} & Q_{2,1} & Q_{3,1} & \dots & \dots & \dots & Q_{365,1} \\
 Q_{1,2} & Q_{2,2} & Q_{3,2} & \dots & \dots & \dots & Q_{365,2} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 Q_{1,N} & Q_{2,N} & Q_{3,N} & \dots & \dots & \dots & Q_{365,N}
 \end{array}$$

На основу израза $Q_{p,sr} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{p,i}}{N}$ добијене су средње месечне ординате криве трајања на овим станицама. Ове ординате су изражене у виду модуларних коефицијената помоћу израза:

$$K = \frac{Q_{p,sr}}{\bar{Q}}$$

где је $\bar{Q}$ средњи вишегодишњи проток на дотичној хидролошкој станици за период N година.



Слика 4.5.1 – Просечна модуларна крива дневних протока реке Ибар на деоници Лопатница Лакат-Ушће

Са овог дијаграма се види да је неравномерност протока на ова два профила скоро идентична, а што се потврђује и степеном природне регулисаности протока која за Лопатницу Лакат износи $\phi = 0.685$, док за Ушће износи $\phi = 0.681$.

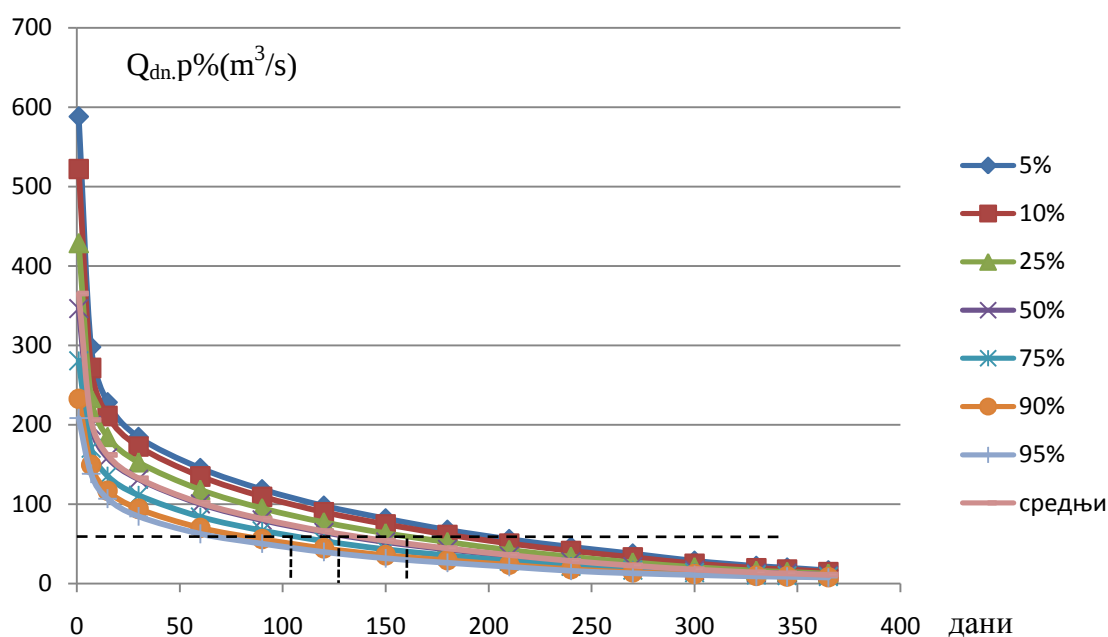
Просечне криве трајања дневних протока на станици Лопатница Лакат и Ушће имају широк дијапазон колебања кривих трајања по појединим годинама. Зато је потребно упоредо са средњом кривом трајања дневних протока одредити и криве трајања протока за различите вероватноће појаве.

Користећи податке о кривим трајања протока по годинама на овим станицама, пробабилистичком анализом, или Log Pearson расподелом, дефинисане су криве трајања дневних протока воде за различите вероватноће појаве (5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, 95%) као и њихове модуларне вредности.

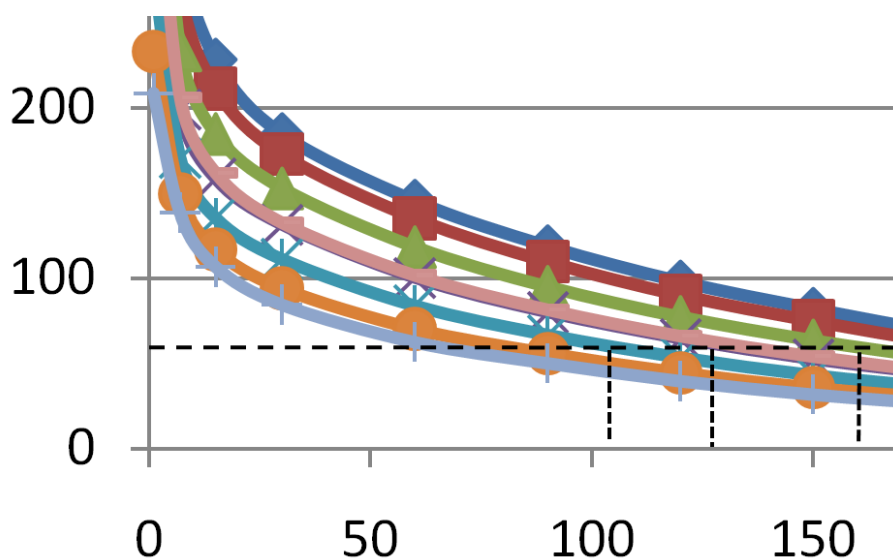
У односу на површину слива, интерполационим поступком између станица Лопатница Лакат и Ушће, дефинисани су модуларни коефицијенти криве трајања дневних протока у профилу МХЕ Бресник.

$$K_{p\%,Ti} = \frac{Q_{p,Ti}}{Q_{sr}}$$

Познавајући средњи вишегодишњи проток на профилу МХЕ Бресник у износу од $Q_{sr} = 59.2 \text{ m}^3/\text{s}$ преко израза $Q_{T,i} = K_{p,Ti} * Q_{sr}$ одређене су координате кривих трајања дневних протока у профилу МХЕ Бресник.



Слика 4.5.3 – Криве трајања дневних протока на реци Ибар, профил Бресник



Слика 4.5.4 – Три најважније криве трајања протока

На основу ових обрада може се закључити, на пример, да трајање средње дневних протока у профили МХЕ Бресник у просечној години у износу од $Q = 59.2 \text{ m}^3/\text{s}$ траје око 125 дана, док на пример овај проток у сушној години ($p=75\%$) или влажној години ($p=25\%$) може трајати 104, односно 160 дана.

Остале комбинације такође се могу добити из ових дијаграма, који између осталог пружају могућност да се за дати проток срачунају трошкови цене коштања постројења и трошкови изгубљене енергије за усвојене параметре. Минимизацијом ових трошкова одређују се оптимални параметри постројења.

4.6 Прорачун великих вода у профилу МХЕ Бресник

За прорачун меродавних великих вода реке Ибар у профилу МХЕ Бресник, за различите повратне периоде, где не постоје осматрања и мерења хидролошких величина, користе се пре свега две методе, које се у сличним условима најчешће примењују у хидролошкој пракси. То су методе које се базирају на теорији:

- граничног интензитета отицаја
- методи "аналогије"

Код обе методе параметри се добијају на хидролошки изученим профилима (где се врше систематска осматрања водостаја и мерења протока), па се потом, одређеним техникама пребацују на хидролошки неизучени профил за који је потребно дефинисати меродавне велике воде. На основу тих "пребачених" параметара обратном процедуром рачунају се тражене меродавне воде.

Као основне, аналогне хидролошке станице, узете су Лопатница Лакат, Ушће и Рашка. За ове станице претходно је извршена је анализа максималних годишњих протока у периоду осматрања.

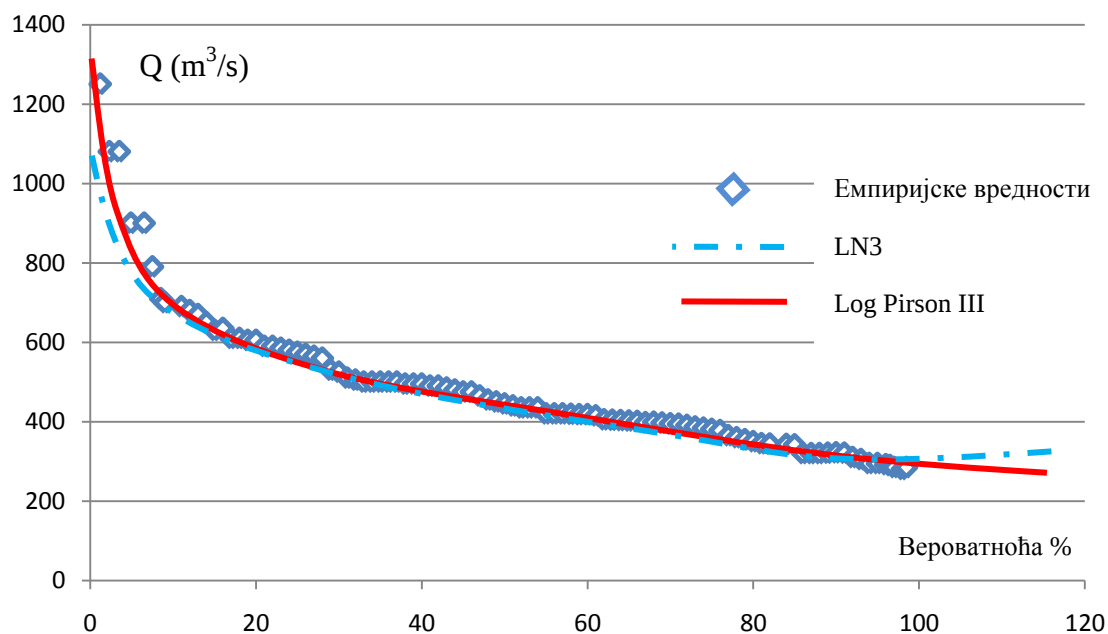
Постоји низ теоријских функција (Gumbel, LN3, Pirson III, Log Pirson III, Weibul) расподеле које се могу користити за описивање расподеле максималних годишњих протока на водомерним станицама Лопатница Лакат, Ушће и Рашка.

Теоријске вредности максималних годишњих протока воде реке Ибар на водомерним станицама Лопатница Лакат, Ушће и Рашка добијене су по оној расподели која има најбољу подударност са емпиријским подацима.

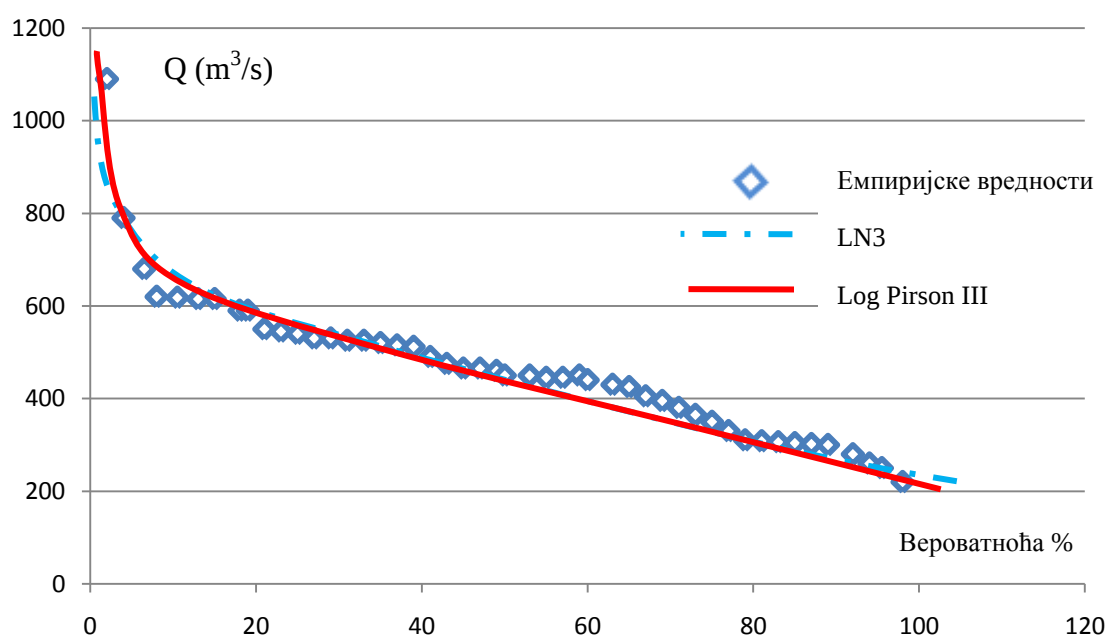
Tabela 4.6.1 – Вредности максималних протока на водомерним станицама на Ибру

Профил водомерна станица	Период посматрања	Статички параметри		Максимални протоци $Q_{\max}$ p (m^3/s)						Тип расподеле
		Q_{sr}	C_v	0.1%	1%	2%	5%	10%	20%	
Лопатница Лакат	1925-2007	388	0.385	1392	928	812	672	573	479	LP3
Ушће	1961-2007	371	0.341	1032	779	706	610	536	460	LN3
Рашка	1947-2003	414	0.344	1231	895	803	685	599	512	LP3

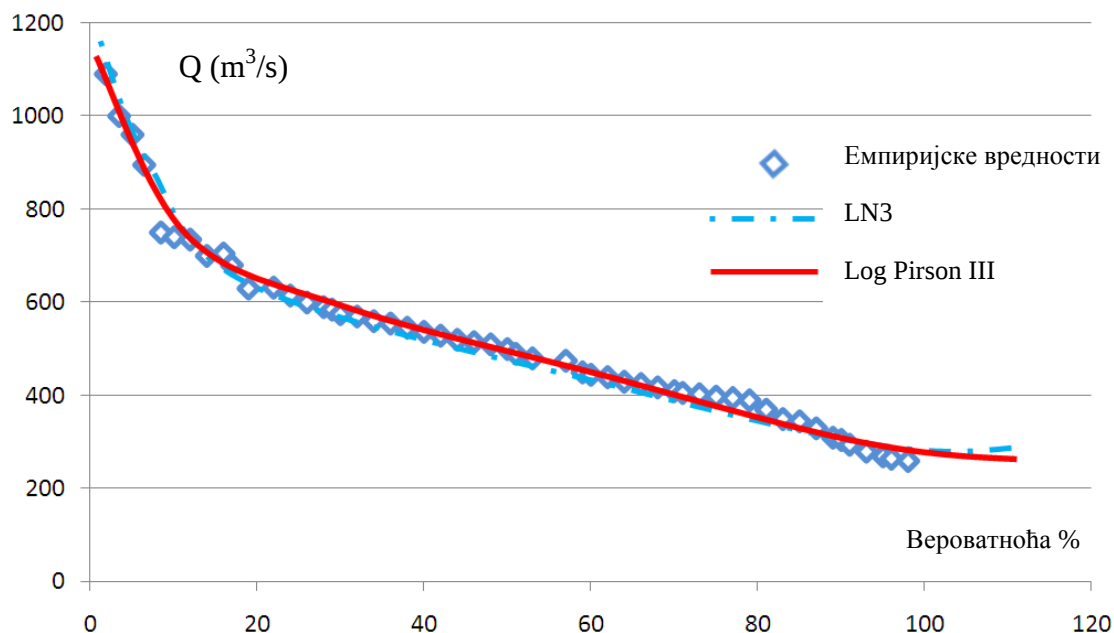
На следећим сликама дат је приказ емпиријске и теоријских расподела. Судећи по тестовима сагласности најбољу подударност емпиријском расподелом вероватноћа имају Log-Pirson III и LN3 расподела чије су вредности и приказане у табели 4.6.1.



Слика 4.6.1 - Емпиријске и теоријске функције расподеле максималних годишњих протока на хидролошкој станици Лопатница Лакат на реци Ибар у периоду 1925-2007



Слика 4.6.2 - Емпиријске и теоријске функције расподеле максималних годишњих протока на хидролошкој станици Ушће на реци Ибар у периоду 1961-2007



Слика 4.6.3 - Емпиријске и теоријске функције расподеле максималних годишњих протока на хидролошкој станици Раика на реци Ибар у периоду 1947-2003

4.6.1 Прорачун великих вода у профилима МХЕ по методи граничног интензитета отицаја

Прорачун максималног протока воде у профиу МХЕ Бресник извршен је и применом теорије граничног интензитета отицаја, чији израз гласи:

$$Q_{max,p} = 16.67 \cdot P_{max,dn,p} \cdot \bar{\psi}_p(\tau) \cdot \varphi \cdot F$$

где је:

$Q_{max,p}$ - максимални проток (m^3/s)

F - површина слива (km^2)

$\bar{\psi}_p(\tau) = \psi(\tau)/\tau$ - ордината редукционе криве кише средњег интензитета за рачунско трајање кише

$t=\tau$, τ – време концентрације

φ - збирни коефицијент отицаја

Рачунско трајање кише, односно време концентрације - τ које у општем случају зависи од времена дотицаја по падинама τ_p и по кориту τ_k , одређује се преко израза:

$$\tau = 1.2\tau_k^{1.1} + \tau_p$$

при чему је време дотицаја по кориту одређено по изразу:

$$\tau_k = \frac{L}{m \cdot l^{1/3} \cdot Q_{max,p}^{1/4}}$$

а време дотицаја по падини слива τ_p

$$\tau_p = \frac{l^{1/2}}{m_p \cdot J_{sl}^{1/4} \cdot \bar{\psi}(\tau_p) \cdot \varphi \cdot P_{max.dn.p}}$$

У горњем изразу m представља параметар који зависи од средње храпавости дуж корита $m = 9 \cdot (20 \cdot n)^{-3/4}$ при чему је коефицијент m , на основу истраживања доведен у везу са средње уравнатим падом преко односа $m = 14.29 / l^{0.1875}$, док је m_p коефицијент који зависи од храпавости падина и стања биљног покривача. У овим прорачунима усвојена је вредност $m_p = 0.10$.

Одређивање коефицијената φ или збирног хидрометеоролошког параметара $\varphi P_{max.dn.p}$ (условног слоја отицаја) за профиле на Ибру на деоници од водомерне станице Лопатница Лакат до водомерне станице Рашка, између којих се налази и профил МХЕ, извршено је користећи податке о максималним осмотреним протоцима на овим профилима и координата редукционих кривих јаких киша за слив Ибра.

Табела 4.6.1.1 – Координате редукционе криве јаких киша за слив Ибра

Ознака	Интервал времена, min								
	10	20	30	60	90	150	300	720	1440
$\psi(\tau)$	0.274	0.354	0.401	0.485	0.536	0.605	0.709	0.860	1.000

Користећи ове податке и итеративни поступак, срачунати су условни слој отицаја или збирни хидрометеоролошки параметар - $(\varphi P_{max.dn.p})_p$ на овим водомерним станицама из релације:

$$\varphi P_{max.dn.p} = \frac{q_{p,a}}{16.67 \cdot \bar{\psi}_p(\tau)}$$

где је:

a - аналог

q_p – максимални модул отицаја

p – вероватноћа појаве

Табела 4.6.1.2 – Резултати прорачуна условног слоја отицаја – збирни хидрометеоролошки параметар $(\phi P_{\max, \text{dn}})_p(\text{mm})$

Река-Профил	Вероватноћа појаве, $p(\%)$					
	0.1%	1%	2%	5%	10%	20%
Ибар, вод. ст. Лопатница Лакат ($F=2528\text{km}^2$, $L=128.1\text{km}$, $I=4.05\text{‰}$, $I_{sl}=296\text{‰}$, $m=10.8$, $m_p=0.10$)	96.3	69.5	62.6	53.5	47	40.8
Ибар, вод. ст. Ушће ($F=2297\text{km}^2$, $L=117.2\text{km}$, $I=4.52\text{‰}$, $I_{sl}=305\text{‰}$, $m=10.4$, $m_p=0.10$)	75.1	60	55.5	48.8	44.3	49.2
Ибар, вод. ст. Рашка ($F=2209\text{km}^2$, $L=110.7\text{km}$, $I=4.73\text{‰}$, $I_{sl}=308\text{‰}$, $m=10.0$, $m_p=0.10$)	87.5	67.9	62.1	54.8	48.5	42.9

Користећи резултате прорачуна условног слоја отицаја или збирног хидрометеоролошког параметра и узимајући у обзир да је условни слој отицаја на станицама Лопатница Лакат и Рашка приближно исти, то је користећи интерполациони поступак између ове две станице (у односу на припадајућу сливну површину) одређен и условни слој отицаја или збирни хидрометеоролошки параметар за профил МХЕ Бресник.

Табела 4.6.1.3 - Резултати прорачуна максималних протока воде у профилу МХЕ Бресник на Ибру по теорији граничног интензитета отицаја

Ознака	Вероватноћа појаве, $p(\%)$					
	0.1%	1%	2%	5%	10%	20%
Условног слоја отицаја ($\phi P_{\max, \text{dn}})_p(\text{mm})$	81.72	61.96	56.76	49.88	44.84	39.96
Максимални проток $Q_{\max, p\%}*(\text{m}^3/\text{s})$	1337	913	804	668	574	484

На основу овако дефинисаног условног слоја отицаја, затим координата просечне криве редукције јаких киша за слив реке Ибар, срачунати су максимални протоци воде у профилу МХЕ Бресник. При овоме је коришћен итеративни поступак прорачуна максималних протока.

4.7 Хидрограђевински део

Грађевински део обухвата све хидрограђевинске објекте који служе за транспорт воде или смештај опреме у којима се врши трансформација енергије, у овом случају из механичке у електричну. У основи, хидрограђевински објекти који улазе у састав било које МХЕ су :

- водозахватне грађевине,
- деривациони цевовод или доводни канал,
- таложник,
- водна комора или водостан,
- цевовод под притиском и
- машинска зграда са одводним каналом.

Сви хидрограђевински и грађевински објекти који су наведени у случају МХЕ Бресник се не налазе у њеном саставу. МХЕ Бресник је по својој грађевинској и хидрограђевинској структури врло слична великим хидроелектранама. Исто се може рећи за њен изглед и начин изградње.

Главни хидрограђевински објекат је сама брана, грађевинске висине 9 m, са 2 темељна испуста, који служе за испирање наноса, а у екстремним ситуацијама се користе и за евакуацију великих вода.

У току изградње примењује се двофазно односно парцијално преграђивање реке. У првој фази се загатом прегради један део речног корита, а темељна јама се дренажа од провирне воде црпљењем. Први део бране који је заштићен загатом прве фазе ради се само на нивоу који обезбеђује стабилност објекта, и пропуштање речног тока у другој фази градње кроз привремене пропусте односно преливе који се у ту сврху остављају.

У другој фази се прво уклања загат прве фазе, и гради се узводни део загата друге фазе са циљем да се река потпуно прегради. Када се отвор затвори и вода испред загата достигне ниво пропуста односно прелива у телу прве фазе бране река је скренута. Преграђивање реке се мора обавити у периоду малих вода, јер је тада снага тока најмања.

Пошто је река скренута кроз први део бране ради се низводни део загата друге фазе, затим се непропусним материјалом зачепи насип од блокова, успостави се црпљење провирне воде, и почне изградња другог дела бране.

По завршетку другог дела бране, уклања се загат друге фазе и вода се пропушта кроз други део, преко прелива и испуста.

Гледајући у правцу тока реке Ибар иза бране се налази слапиште са бетонским препрекама које служе да апсорбују енергију воде при активирању преливних поља. Овим се драстично умањује разорна енергија великих вода, што је врло значајно јер се

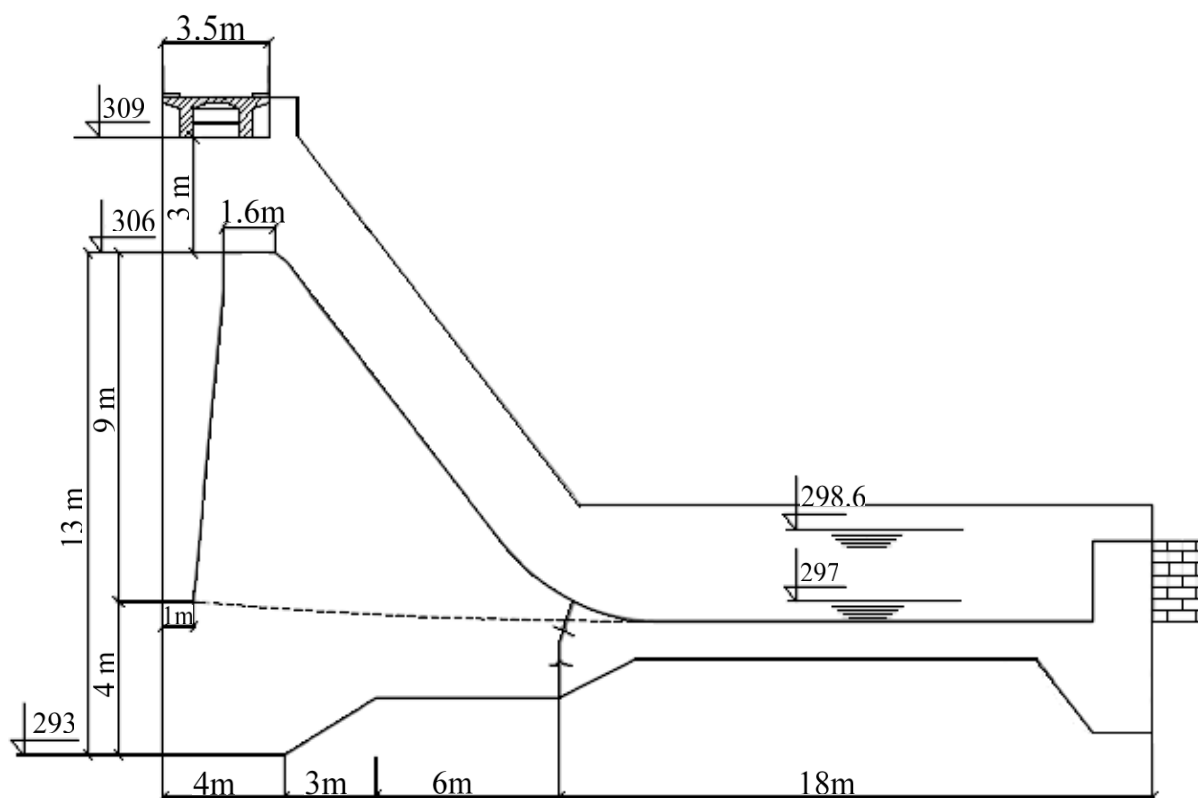
на тај начин, пре свега, штите бочне стране бране, речна обала као и само дно реке непосредно иза бране.

Узимајући у обзир наведено, неопходно је извршити прорачун бране и осигурати је од могућег узгона, клизања или превртања. Прорачун бране за ове параметре се према захтевима водопривреде, врши на дејство стогодишњих вода. Треба имати у виду да ова брана према законима у Србији спада у велике бране.

4.7.1 Бетонска брана

Бране су јединствене структуре које без обзира на величину и тип показују велику комплексност у свом одговору на оптерећење и у својој итеративној вези са хидролошким и геолошким карактеристикама. [13]

Брана хидроелектране је бетонска - гравитациона, грађевинске висине 9 m. Довод воде из акумулационог језера до турбина врши се помоћу 4 цевовода пречника 3.5 m који пролазе кроз тело бране. Кроз тело бране су постављена 2 темељна испуста пречника 3.2 m и они могу да пропусте 200 m³/s воде у случају великих вода. Ширина слободног прелива је 60 m. При протоку $Q = 913 \text{ m}^3/\text{s}$ висина млаза на преливу је $H_o = 3,0 \text{ m}$. Укупна дужина преливног дела бране је 60 m а непреливног дела је 20 m. При протоку $Q = 1337 \text{ m}^3/\text{s}$ висина млаза на преливу је $H_o = 3.87 \text{ m}$.



Слика 4.7.1.1 – Пресек преливног дела бране

На слици 4.7.1.1 приказан је пресек преливног дела бетонске бране МХЕ Бресник. На основу капацитета прелива од $Q_p = 913 \text{ m}^3$ може се добити висина воде на преливу.

$Q_p = 913 \text{ m}^3/\text{s}$ – Капацитет прелива

$B = 60 \text{ m}$ – Ширина преливног дела бране

$C_p = 0.661$ – Коефицијент прелива

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$ – Убрзање земљине теже

$$Q = B \cdot C_p \cdot \sqrt{2g \cdot H_o^3} \rightarrow H_o = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{2B^2 C_p^2 g}} = 3,0 \text{ m}$$

4.7.2 Машинска зграда

Машинском зградом код МХЕ се назива просторија у којој је смештен комплетан агрегат (предтурбински затварач, турбински регулатор, турбина, замајац, мултипликатор и генератор). Међутим, у машинској згради се смештају и поједини делови електро – машинске опреме (ормарићи за контролно – мерну и управљачку опрему), помоћна опрема и опрема за противпожарну заштиту.

Када се ради о агрегатима који имају значајну масу онда се мора предвидети да се у оквиру машинске хале монтира мосна дизалица која ће служити за манипулацију елементима агрегата при монтажи, демонтажи и ремонту. Таква машинска зграда се предвиђа и за МХЕ Бресник и она се налази одмах уз брану, тачије с обзиром на тип турбине она је инкорпорирана у саму брану.

За израду зидова зграде користе се армирани бетон и камен као и за кровну конструкцију. При употреби бетона за зграду он мора бити водонепропусан што се постиже адитивима. Прозорски оквири раде се од металне конструкције и застакљују се армираним стаклом, с тим да се омогући периодично чишћење.

За естетско обликовање зграде користи се камен, профилисани алуминијум, а за естетско облагање зидова користе се висококвалитетне керамичке плочице и др. Улазна врата раде се од метала и могу се отворати на класичан начин, подизањем или спуштањем помоћу одговарајућих механизма.

Висина просторије у којој се налази комплетан агрегат са осталом опремом треба да буде између 4 и 5 метара. Површина просторије када је у питању ова МХЕ ће се кретати између 220 и 280 m^2 .

4.8 Машински и хидромашински део

На основу података добијених осматрањем водостаја и мерењем дневних и карактеристичних протока на 3 регуларне државне хидрометеоролошке на реци Ибар, (ВС Лопатница Лакат, ВС Ушће и ВС Рашка) као и на основу осталих потребних података, извршена је хидролошка анализа реке Ибар на профилу преграде односно

броне МХЕ Бресник. У наведеној хидролошкој анализи дефинисани су карактеристични рачунски протоци који су битни за одређивање инсталисаног протока турбина МХЕ. Профил бране МХЕ налази се у правцу села Бресник.

Табела 4.8.1 – Расподела средње месечних протока на реци Ибар од 1952. – 2002. год

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$Q_{sr.mes}$	56.4	58.8	70.9	110.4	111.3	61.6	31	18.5	22.4	37.5	60.1	71.6
$Q_{sr.mes.max}$	141.8	157.3	161.6	207	192.3	104.1	60.4	42.8	69.7	166	220.9	219.6
$Q_{sr.mes.min}$	10.1	11.6	30.6	55.1	43.3	21	13.2	9.2	9	8.5	12.7	10.8

У табели 4.8.1 приказане су средње вредности месечних протока које су се јављали током посматраног периода од 1952. до 2002. године. На основу ове табеле је видљиво да у овом периоду од 51 године појавили максимални средње месечни протоци који су достизали вредност од 220.9 m³/s а минимални средње месечни протоци у најекстремнијим сушним годинама нису падали испод 8.5 m³/s.

Карактеристични средње месечни протоци на профилу бране из претходне табеле показују да се могу очекивати значајне количине воде. Сређивањем вредности за протоке које су дате за период од 1952. до 2002. године добија се:

Табела 4.8.2 – Средњи годишњи протоци

$Q_{sr.mes}$ [m ³ /s]	59.24
$Q_{sr.mes.max}$ [m ³ /s]	145.34
$Q_{sr.mes.min}$ [m ³ /s]	19.64

На овом профилу могу се очекивати средњи годишњи протоци који се крећу у распону од 19.64 m³/s у свом минимуму до 145.34 m³/s у максимуму. Средњи годишњи проток на профилу бране МХЕ Бресник износи 59.24 m³/s.

Табела 4.8.3 – Средње месечни протоци реке Ибар у периоду од 1995. до 2002. године на профилу бране МХЕ Бресник

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$Q_{sr.mes}$	56.4	58.8	70.9	110.4	111.3	61.6	31	18.5	22.4	37.5	60.1	71.6
$Q_{sr.mes.max}$	88.4	62.1	92.8	174.2	161.2	87.1	41.3	27	52.3	104.8	98	137.7
$Q_{sr.mes.min}$	19.5	16.3	30.6	55.1	43.3	21	13.2	9.2	10	11.9	19.6	13.8

Табела 4.8.4 – Средње годишњи протоци у периоду од 15 година

$Q_{sr.mes}$ [m ³ /s]	50.27
$Q_{sr.mes.max}$ [m ³ /s]	93.93
$Q_{sr.mes.min}$ [m ³ /s]	21.99

Ако се упореде претходно дате табеле за различите временске периоде видимо да период задњих 15 година, даје нешто лошије резултате у погледу средњих годишњих протока и максималних средњих годишњих протока у односу на период од

51 године али су зато минималне вредности средњег годишњег протока порасле за око 11,92 %.

С обзиром на климатске промене и на повећан број сушних година у последњих 15 до 20 година био је и очекивано да хидролошки резултати за период од задњих 15 година буду лошији. Међутим анализом добијених резултата може се закључити на наведене појаве немају већег утицаја на избор инсталисаног протока МХЕ Бресник.

На основу ових података и уважавајући вредности добијене у последњих 51 годину из претходних табела а нарочито из табеле која дефинише средње месечне протоке могу се дефинисати сви значајнији хидролошки параметри који утичу на инсталисану снагу и правилан избор турбина МХЕ. Анализом поменутих података, може се закључити да се на позицији профила бране МХЕ, располаже следећим протоцима:

а) Средње воде, $Q_{sr} = 59.2 \text{ m}^3/\text{s}$

б) Мале воде или биолошки минимум (минимални средње месечни проток 95% обезбеђености) $Q_{min} = 8.16 \text{ m}^3/\text{s}$

4.8.1 Дефинисање инсталисаног протока меродавног за прорачун снаге турбина МХЕ Бресник

У хидролошкој студији дефинисан је гарантовани проток на профилу водозахвата који мора бити увек обезбеђен. У екстремно сушним годинама да би се задовољио биолошки минимум МХЕ мора стати са радом.

Инсталисани проток ће се добити када се сагледа комплетна хидролошка слика реке у периоду од 1952. до 2002. године а пре свега на основу табеле која дефинише средње месечне протоке.

Анализом ове табеле и осталих података утврђено је следеће:

- да се од на профилу бране МХЕ могу очекивати средњи месечни протоци већи од $108 \text{ m}^3/\text{s}$ у трајању од 60 дана;
- да се од на профилу бране МХЕ могу очекивати средњи месечни протоци већи од $68 \text{ m}^3/\text{s}$ у трајању од 120 дана;
- да се од на профилу бране МХЕ могу очекивати средњи месечни протоци већи од $60 \text{ m}^3/\text{s}$ у трајању од 6 месеци годишње, односно 180 дана;
- да се од на профилу бране МХЕ могу очекивати средњи месечни протоци већи од $56 \text{ m}^3/\text{s}$ у трајању од 8 месеци годишње, односно 240 дана;
- да се од на профилу бране МХЕ могу очекивати средњи месечни протоци већи од $16 \text{ m}^3/\text{s}$ у трајању од 12 месеци годишње, односно 365 дана;
- да се максимални протоци најчешће обухватају месеце децембар, март, април и мај;

Узимајући у обзир наведено може се усвојити оквирни опсег инсталисаних протока МХЕ Бресник у износу од 100 до $120 \text{ m}^3/\text{s}$.

Табела 4.8.1.1 – Расподела дужина трајања протока МХЕ Бресник за период 1952. до 2002.

$Q_{inst}[m^3/s]$	n_d	>30	>60	>90	>120	>150	>180	>210	>240	>270	>300
≥ 100.00	58.612	43	28	16	9	5	0	0	0	0	0
≥ 103.00	57.273	42	27	16	7	4	0	0	0	0	0
≥ 106.00	51.335	39	26	15	6	3	0	0	0	0	0
≥ 109.00	47.335	37	25	13	5	2	0	0	0	0	0
≥ 112.00	42.687	34	25	10	3	2	0	0	0	0	0
≥ 116.00	39.465	34	21	10	3	1	0	0	0	0	0
≥ 120.00	32.913	29	16	9	3	0	0	0	0	0	0

У табели 4.8.1.1 је за узорак од 51 године у периоду од 1952. до 2002. године, приказана расподела броја година са одговарајућим дужинама трајања протока. У првој колони су дате величине протока а у другој колони средњи број дана са протоком већим или једнаким од наведеног.

На основу табеле 4.8.1.1 може се закључити да за протоке од 106, 109 и 112 m^3/s имамо да број година за које су овакви протоци били дужи од 60 дана износи 26, 25 и 25, односно приближно око половине укупног броја година. Узимајући у обзир наведено, може се усвојити да инсталисани проток МХЕ Бресник има вредност:

$$Q_{in. max} = 109 m^3/s$$

Минимални радни проток може се одредити тако што се од минималног вишегодишњег месечног протока (месец август $Q = 9.2 m^3/s$) одузме вредност количине воде предвиђена за рибљу стазу ($Q = 2 m^3/s$) и затим дода вредност биолошког минимума ($Q = 8.16 m^3/s$) што даје вредност :

$$Q_{in. min} = 15.36 m^3/s$$

Тачније, проток кроз турбине агрегата МХЕ Бресник ће се кретати у распону 15.36 m^3/s до 109 m^3/s .

Табела 4.8.1.2 – Средње месечни протоци кроз турбине МХЕ Бресник од 1952. до 2002. године

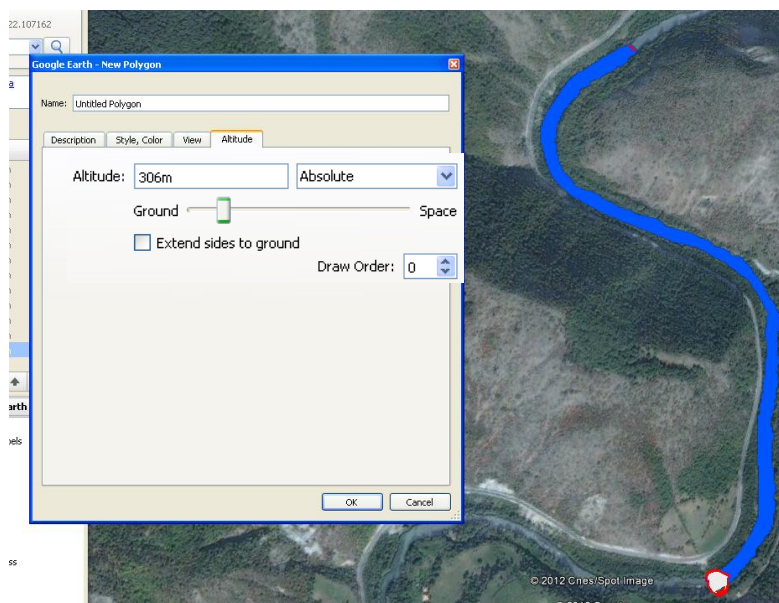
Ознака	Средње месечни инсталисани протоци у периоду од 1952. до 2002.												Q _{sr.in.god}
	Q _{sr.inst.mes} [m ³ /s]												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Q _{sr.in.mes}	54.8	57.2	69.3	108	109.7	60	29.4	16.9	20.8	35.9	58.56	70.1	57.6

Имајући у виду, инсталисани пад, тип и намену електране као и остале параметре, за МХЕ Бресник, најбоље одговарају три типа турбина а то су, Капланова турбина, капсулна (пропелерна) турбина и Банки турбина. Међутим, узимајући у обзир распон од минималног до максималног инсталисаног протока који је доста широк јасно је да се и у случају примене најсавременијих и најквалитетнијих турбина овај распон не може покрити са добрим коефицијентом искоришћења уколико се користи само једна турбина односно агрегат. На основу претходно наведених чињеница, може се закључити да у циљу потпуног искоришћења расположивог хидропотенцијала

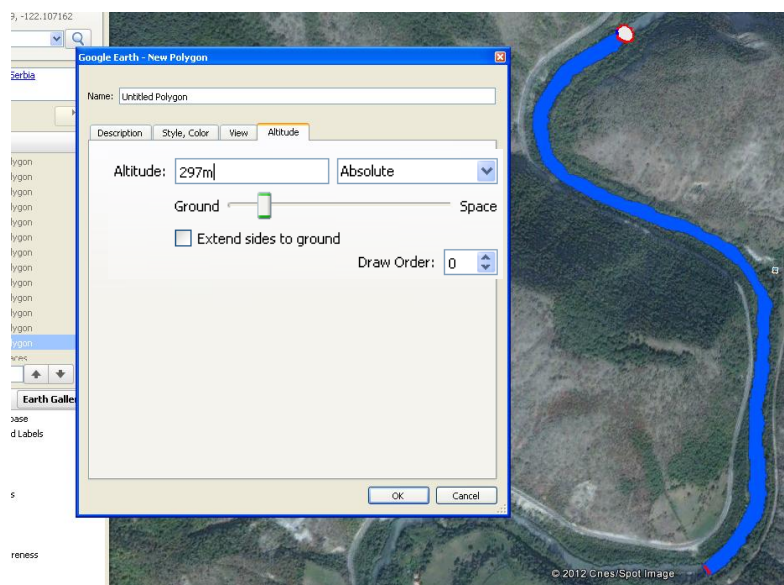
локације и покривања комплетног распона протока воде, у машинској згради треба поставити четири агрегата са Каплановим двоструко регулисаним турбинама или капсулним турбинама, такође двоструко регулисаним.

Бруто инсталисана висина може се добити на основу израза:

$$H_{br}=KGV-KDV=306-297=9 \text{ m}$$



Слика 4.8.1.1 – Надморска висина на почетку акумулације



Слика 4.8.1.2 – Надморска висина на крају акумулације

Нето инсталисана висина добија се када се од бруто инсталисане висине одузму губици:

$$H_{inst}=H_{br} - \Delta H_u$$

За МХЕ Бресник укупни губици су $\Delta H_u = 0.5\text{m}$ тако да нето инсталисана висина износи $H_{inst}=8.50\text{ m}$. Пошто је МХЕ Бресник проточна, успутни губици у цевима практично не постоје јер се машинска зграда налази у самој брани. Такође, великих локалних губитака нема јер нема наглих сужења и проширења као ни кривина док су решетке које стоје на улазу у велике цеви турбина под правим углом и ту су опет губици занемарљиви. Губици који постоје су губици пре свега у висини турбина односно њихових одстојања од земље и губици усмеривачких лопатица и износе укупно 0.5 m .

Ради прецизније анализе, инсталисана снага МХЕ ће бити варирана још у три пута (променом висине бране) што значи да ће прорачуни бити обављени за укупно четири случаја када нето инсталисане висине износе $8,10\text{ m}$, $8,30\text{ m}$, $8,50\text{ m}$ и $8,70\text{ m}$. Осим тога биће вариран и инсталисани проток МХЕ у распону од $100\text{ m}^3/\text{s}$ до $120\text{ m}^3/\text{s}$.

$$P_{inst} = Q_{inst} \cdot H_{inst} \cdot g \cdot \rho$$

$$g = 9.81\text{ m/s}^2$$

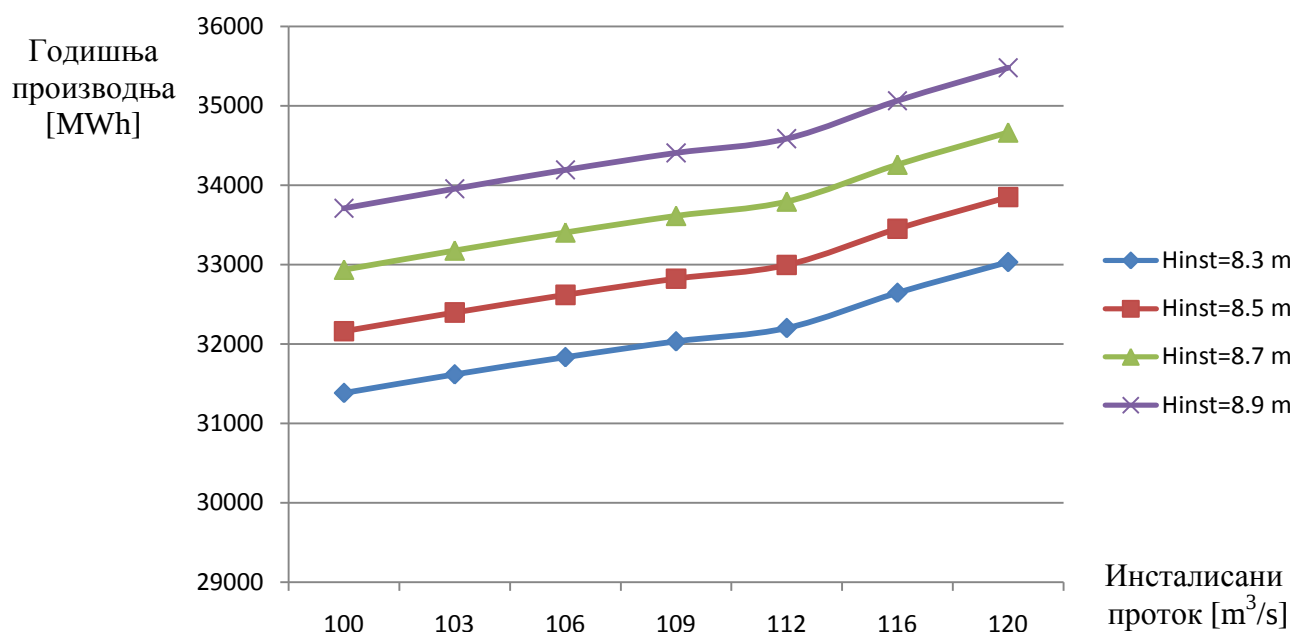
$$\rho = 852.11\text{ kg/m}^3$$

Табела 4.8.1.3 – Табела производње електричне енергије МХЕ Бресник за период од 1952. до 2002. године

$Q_{inst}[\text{m}^3/\text{s}]$	$H_{inst}[\text{m}]$	$P_{inst}[\text{kW}]$	$E_{sr}[\text{MWh}]$	$n_{hsr}[\text{h}]$
100	8.10	6771	31383	4635
103	8.10	6975	31617	4533
106	8.10	7178	31834	4435
109	8.10	7381	32033	4340
112	8.10	7584	32201	4246
116	8.10	7855	32645	4156
120	8.10	8126	33032	4065
$Q_{inst}[\text{m}^3/\text{s}]$	$H_{inst}[\text{m}]$	$P_{inst}[\text{kW}]$	$E_{sr}[\text{MWh}]$	$n_{hsr}[\text{h}]$
100	8.30	6939	32162	4635
103	8.30	7147	32397	4533
106	8.30	7355	32619	4435
109	8.30	7563	32823	4340
112	8.30	7771	32995	4246
116	8.30	8049	33451	4156
120	8.30	8327	33849	4065
$Q_{inst}[\text{m}^3/\text{s}]$	$H_{inst}[\text{m}]$	$P_{inst}[\text{kW}]$	$E_{sr}[\text{MWh}]$	$n_{hsr}[\text{h}]$
100	8.50	7106	32936	4635
103	8.50	7319	33177	4533
106	8.50	7532	33404	4435
109	8.50	7745	33613	4340
112	8.50	7959	33793	4246
116	8.50	8243	34257	4156
120	8.50	8527	34662	4065
$Q_{inst}[\text{m}^3/\text{s}]$	$H_{inst}[\text{m}]$	$P_{inst}[\text{kW}]$	$E_{sr}[\text{MWh}]$	$n_{hsr}[\text{h}]$
100	8.70	7273	33710	4635
103	8.70	7491	33956	4533
106	8.70	7710	34193	4435
109	8.70	7928	34407	4340
112	8.70	8146	34587	4246
116	8.70	8437	35064	4156
120	8.70	8728	35479	4065

У табели 4.8.1.3 дата су инсталисане снаге, средње годишње производње и часовна искоришћења МХЕ Бресник за биолошки минимум од $8.16 \text{ m}^3/\text{s}$ и проток преко рибље стазе од $2 \text{ m}^3/\text{s}$ и различите инсталисане протоке и падове. Инсталисани протоци су варијани у распону од 100 до $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Прорачун је изведен на узорку од 51 године у периоду 1952. до 2002. године. На основу табеле је видљиво да се часовна искоришћења крећу у распону од 4065 до 4635 сати годишње независно од инсталисане висине.

Зависност произведене електричне енергије у функцији од инсталисане снаге при чему је инсталисана висина узета као параметар, графички је приказана на слици 4.8.1.3



Слика 4.8.1.3 – Просечна годишња производња за МХЕ Бресник за период од 1952. до 2002. године

На основу дате табеле и дате слике је видљиво да се највећа снага МХЕ и највећа производња електричне енергије добија за највећи инсталисани пад и за највећи инсталисани проток што је у складу са математичким изразом за снагу МХЕ.

Приликом избора инсталисане снаге електране односно инсталисаног пада и инсталисаног протока неопходно је узети неколико фактора у обзир.

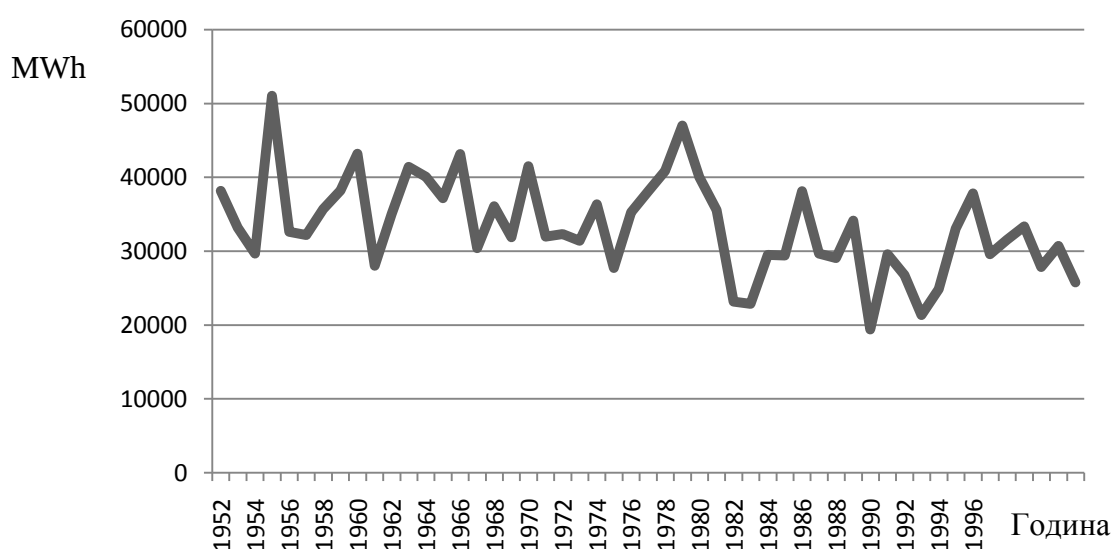
Према важећим прописима, инсталисана снага МХЕ у Републици Србији не би требало да пређе 10 MW јер уколико њена снага јесте већа од 10 MW она прелази у групу стандардних тј. великих хидроелектрана. У случају да хидроелектрана припада групи великих односно стандардних, онда за њу не важе нормативи који важе за МХЕ а између осталог и пропис о повлашћеним ценама откупа електричне енергије из МХЕ.

На слици 4.8.1.3 приказана је релативна промена снаге и производње електричне енергије у зависности од инсталисаног протока. Вредности су нормиране у односу на инсталисану снагу и производњу електричне енергије за изабрани инсталисани нето пад од 8,50 m и инсталисани проток од $109 \text{ m}^3/\text{s}$ (7745kW и 33613 MWh).

Са слике 4.8.1.3 се види да при повећању протока од 109 до 120 m³/s снага електране порасте за 8,89% а производња за 1,90%. Са друге стране при смањењу протока са 109 на 100 m³/s снага електране опадне за исту вредност као и у претходном случају, 8,89% а производња електричне енергије опадне за 2,58%.

Табела 4.8.1.4 – Производња електричне енергије МХЕ Бресник на годишњем нивоу од 1952. до 2002. године

Год	ΣЕ[MWh]	n _h [h]	1977	38079	5305
1952	38136	5313	1978	40828	5688
1953	33169	4621	1979	46987	6546
1954	29673	4134	1980	40017	5575
1955	51035	7110	1981	35531	4950
1956	32609	4543	1982	23134	3223
1957	32150	4479	1983	22847	3183
1958	35660	4968	1984	29458	4104
1959	38215	5324	1985	29386	4094
1960	43197	6018	1986	38108	5309
1961	28008	3902	1987	29659	4132
1962	35035	4881	1988	29035	4045
1963	41417	5770	1989	34102	4751
1964	40067	5582	1990	19373	2699
1965	37153	5176	1991	29551	4117
1966	43146	6011	1992	26759	3728
1967	30406	4236	1993	21311	2969
1968	36076	5026	1994	24835	3460
1969	31855	4438	1995	33054	4605
1970	41510	5783	1996	37792	5265
1971	31942	4450	1997	29587	4122
1972	32308	4501	1998	31497	4388
1973	31403	4375	1999	33341	4645
1974	36313	5059	2000	27843	3879
1975	27714	3861	2001	30693	4276
1976	35251	4911	2002	25754	3588



Слика 4.8.1.4 – Дијаграм производње електричне енергије за МХЕ Бресник у периоду од 1952. до 2002. године

4.8.2 – Избор параметара турбине

Капланова турбина је пропелерна врста водних турбина, са закретним лопатицама на ротору и ради само на ниским падовима воде, углавном са великим протоком. [6] Да би се смањили ударни губици и осигурало струјање воде са најмање хидрауличких губитака, у већини пропелерних турбина, лопатице радног кола могу се закретати у погону. Изведба турбина са закретним лопатицама ротора је сложенија него изведба обичних пропелерних турбина, али њихове енергетске карактеристике су знатно повољније. Њихов степен искоришћења може бити и преко 90 %.

Пропелерне турбине спадају у ред аксијалних хидрауличких стројева са применом при малим падовима и великим протоцима. Корисни падови се крећу од неколико метара па све до 60-70 метара. Због таквих карактеристика, овакве турбине се углавном примењују у равничарским подручјима, на рекама које осигуравају целогодишњи високи проток, а изградњом брана се осигурава потребан пад. Излазне снаге Капланових турбина могу бити од 5 до 120 MW. [14]

Делови турбине:

Захват воде се изводи уређајем који је обично трапезног пресека, изведен од бетона. Конструкција уређаја треба осигурати уједначену дистрибуцију воде по излазном пресеку уређаја, те спречити одвајање струје на статорским лопатицама. Код високих падова снабдевни апарат се изводи од челика у облику спирале кружног попречног пресека.

Спроводних лопатица има обично 20-32. Спроводне лопатице, осим регулације протока, имају задатак да правилно усмере струју воде према роторским лопатицама. Регулација протока се изводи закретањем регулацијских лопатица око својих оса, а у граничном случају могуће је лопатицама потпуно затворити проточне канале.

Ротор се састоји од лопатица учвршћених на ротирајуће вратило чији број, зависно од пада, се мења између 4 и 8 лопатица. Што је мањи пад, то је и број лопатица ротора мањи. Роторске лопатице могу бити чврсто везане на вратило, а такве турбине се тада називају пропелерним турбинама. Облик и дебљина профила лопатице се мењају променом радијалне координате, у односу на осу строја. Роторске лопатице могу бити и помичне у односу на вратило строја, када закретањем око властитих оси врше фино подешавање опструјавања профила, осигуравајући високу искористивост турбине у широком радном подручју.

Двоструком регулацијом (закретањем регулацијских и роторских лопатица) могуће је осигурати високу корисност у широком радном подручју. Почеци и крајеви роторских лопатица (гледано радијално), као и њихови (лабави) држачи, морају бити обрађени у облику кугле како би се, без обзира на положај, осигурао минимални зазор и тиме спречило претицање воде с притисне на подпритисну страну лопатице. Промер ротора може бити од 2 до 8 м. Обично се окреће са 79 до 429 обртаја у минути.

Транспорт воде из ротора врши дифузор који уједно, смањењем излазне енергије, повећава укупну искоришћеност турбине. [14]

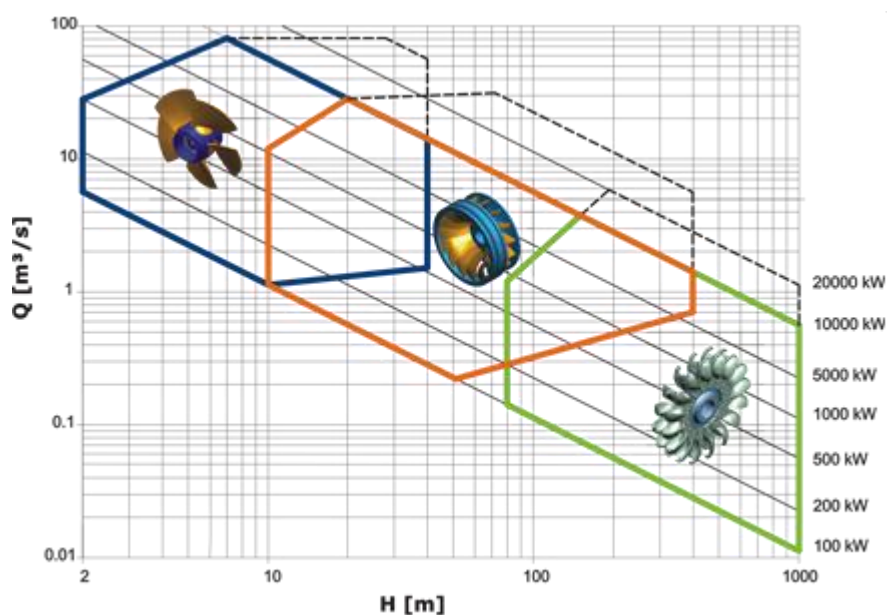
Начин рада:

Главни водени ток кроз Капланову турбину је аксијалан. Угао заокретања лопатица ротора одређује се према отвору помоћног кола и тренутном паду.

Комбинаторна веза се дефинише тако да се оствари највећа могућа корисност у свим погонским условима. Однос отвора лопатица помоћног и радног кола код турбина са заклетним лопатицама ротора регулише се преко посебног уређаја који се назива кулиса. Систем аутоматске регулације турбина са помичним лопатицама ротора осим помоћним колом, управља и радним колом закрећући лопатице ротора, па се такве турбине називају двоструко регулисаним турбинама.

Капланове турбине спадају у групу реакционих турбина, што значи да се притисак млаза воде мења проласком кроз турбину. Турбине са већим падом имају већу разлику притисака између лопатица ротора и дифузора, тако да на лопатицама ротора долази до појаве кавитације.

Да би се повећао степен искоришћења Капланове турбине и унапредила његова конструкција, у последње време је почела да се примењује рачунарска динамика флуида. Осим тога, покушава се повећати број преживелих риба, које пролазе кроз турбину. Лопатице ротора се закрећу уз помоћ хидрауличког уља под високим притиском, тако да је један од главних проблема конструкције спречити испуштање уља кроз заптивке, а тиме и загађивање реке. [14]



Слика 4.8.2.1 – Опсег различитих турбина у зависности од протока и напора[15]

За наведене падове најчешће се користи или двоструко регулисана Капланова турбина или двоструко регулисана капсулна (пропелерна) турбина, јер у односу на Банки турбину имају већи степен искоришћења. Уколико су у некој МХЕ инсталиране турбине истих карактеристика као у случају МХЕ Бресник њихова појединачна снага може се добити из израза:

$$P_t = \frac{P_{inst}}{m \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{mul}}$$

где је:

$P_{inst} = 7745 \text{ kW}$ – Укупна инсталисана снага МХЕ

$m = 4$ – Број агрегата

$\eta_{gen} = 0.96$ – Степен искоришћења генератора

$\eta_{mul} = 0.98$ – Степен искоришћења мултипликатора

За МХЕ Бресник добија се снага сваке појединачне турбине од $P_t = 2058 \text{ kW}$. Опсег специфичних брзина обртања Капланове турбине добија се на основу израза да је:

$$n_s = \text{од } \frac{2088}{\sqrt{H_{inst}}} \text{ до } \frac{2702}{\sqrt{H_{inst}}}$$

Опсег специфичних брзина обртања је за Капланове турбине од 716.0 min^{-1} до 926 min^{-1} .

Специфична брзина обртања Капланове турбине се може добити и помоћу обрасца:

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{P_t}}{H_{inst}^{5/4}}$$

где је n брзина обртања турбине.

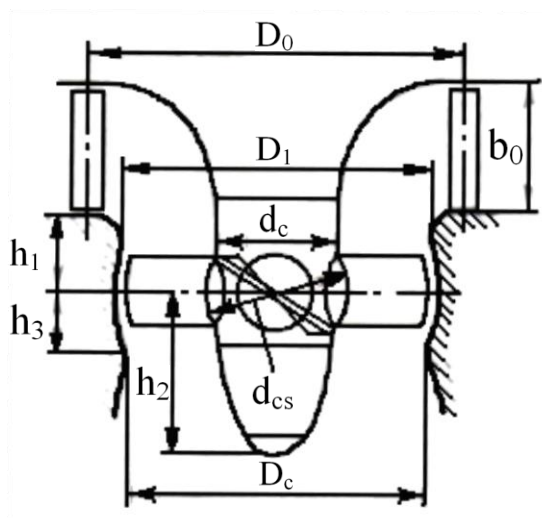
Одавде се добија да је брзина обртања турбине $= n_s \cdot \frac{H_{inst}^{5/4}}{\sqrt{P_t}}$, $n = n_s / 3.102$ односно да опсег обртања турбине износи од 229.063 min^{-1} до 296.246 min^{-1} . Ако се усвоји номинална брзина обртања турбине на 250 min^{-1} добија се да је номинална односно синхрона брзина обртања турбине $n_{sn} = 250 \cdot 3.102 = 775.5 \text{ min}^{-1}$.

Ако се усвоји да синхрона брзина обртања генератора износи 500 min^{-1} може се добити да преносни однос мултипликатора износи $N_{mul} = 1:2$

$$D_1 = \frac{60}{\pi \cdot n_n} \cdot \varepsilon_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{inst}}$$

$\varepsilon_v = 0.0233 \cdot n_{sn}^{2/3}$ – коефицијент брзине

$n_n = 250 \text{ min}^{-1}$ – номинална брзина обртања турбине



Слика 4.8.2.2 – Димензије Капланове турбине за МХЕ Бресник

$D_1 = 1.94 \text{ m}$	Усвојено $D_1 = 2 \text{ m}$
$D_0 = D_1 \cdot 1.1 = 2.134 \text{ m}$	Усвојено $D_0 = 2.150 \text{ m}$
$D_c = D_1 / 1.2 = 1.61 \text{ m}$	Усвојено $D_c = 1.6 \text{ m}$
$h_1 = D_1 / 5.7 = 0.34 \text{ m}$	Усвојено $h_1 = 0.35 \text{ m}$
$h_2 = h_1 / 0.6 = 0.56 \text{ m}$	Усвојено $h_2 = 0.55 \text{ m}$
$h_3 = h_1 / 2.1 = 0.16 \text{ m}$	Усвојено $h_3 = 0.15 \text{ m}$
$d_{cs} = h_2 = 0.56 \text{ m}$	Усвојено $d_{cs} = 0.55 \text{ m}$
$d_c = d_{cs} - 0.05 = 0.51 \text{ m}$	Усвојено $d_c = 0.5 \text{ m}$
$b_0 = D_1 / 3.42 = 0.56$	Усвојено $b_0 = 0.55 \text{ m}$
За Капанову турбину ових димензија број лопатица је $z=4$.	



Слика 4.8.2.3 – Капанова турбина са 4 лопатице [16]

4.8.3 Хидромеханичка, хидромашинска и машинска опрема

Хидромеханичка опрема МХЕ обухвата систем устава и затварача који се налазе на брани, у машинској згради и одводним каналима. У ову групу спадају такође и заштитне решетке на улазним грађевинама или одводним каналима као и аутоматске односно ручне чистилице истих.

У хидромашинску опрему спада сва опрема којом се покрећу и заустављају турбине и којом се регулише рад турбина као и саме турбине.

У машинску опрему спадају дизалице и кранови инсталирани у машинској згради и/или осталим постројењима и објектима МХЕ.

Хидромашинска опрема има различит дизајн с обзиром на задатак и намену у оквиру хидроенергетског постројења. Ова опрема се ради од челика за конструкцију, нерђајућих хром - никл челика, нискоугљеничних и високоугљеничних челика и других материјала и уграђује се најчешће у хидрограђевинске објекте који садрже машинску и хидромашинску опрему као што је машинска зграда и сама брана.

У хидромашинску опрему спада и помоћна опрема која је неопходна за безбедан и квалитетан рад постројења и погонских машина. Хидромашинска опрема ради у врло отежаним условима, најчешће на отвореном простору, па се она мора заштитити, извести и уградити у објекат према одговарајућим прописима и стандардима. На овај начин хидромашинска опрема је у сваком моменту спремна за функционалан рад.

-Турбинска регулација

Регулација учестаности врши се контролом активне снаге и то применом турбинске регулације при чему се регулише број обртаја турбине или доток воде у турбину. Тип примењене турбинске регулације зависи од произвођача опреме, мада се у последње време скоро по правилу користи дигитални тип регулације. У случају МХЕ Бресник примењени су дигитални системи турбинске регулације са електрохидрауличким актуаторима, мада се могу применити и неки други типови турбинске регулације истих или сличних карактеристика.

Турбински регулатор врши регулацију брзине обртаја турбине, снаге и отвора усмерног апарата односно предтурбинског затварача у свим режимима рада агрегата. Осим PLC рачунара, турбински регулатори у МХЕ Бресник имају у свом саставу и електрохидрауличке елементе као актуаторе. Актуатор претвара електронске сигнале на излазу из турбинског регулатора у механичке помераје регулационих органа турбине чиме се врши регулација турбине.

У склопу регулатора налазе се следеће јединице:

- електронски дигитални турбински регулатор,
- хидраулички управљачки део,
- уређај за генерисање притиска,
- турбинска заштита.

4.8.4 Биланс вода у акумулацији

Водопривредни биланс акумулације служи за праћење расположивих количина воде по квалитету и квантитету за дугорочно планирање режима рада акумулације. Једначина водног биланса акумулације је:

$$V_{i+1} = V_i + (Q_i - P_i - g_i) \cdot \Delta t_i$$

где су:

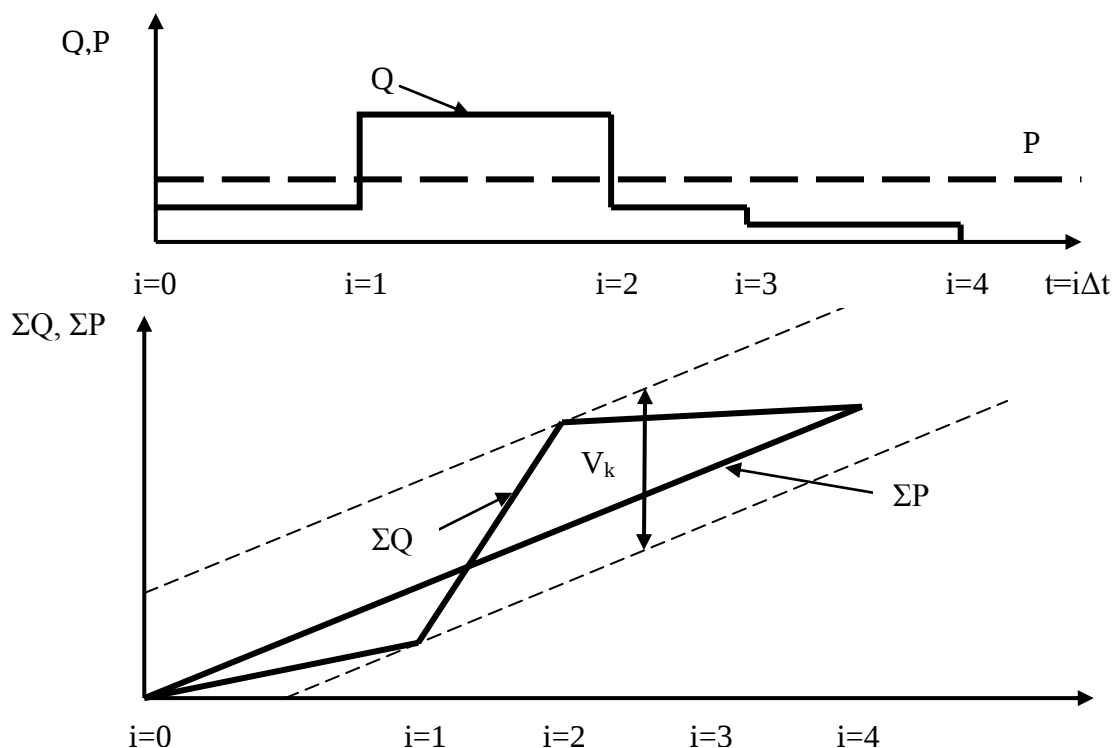
V_i - Запремина воде у акумулацији у временском интервалу

Δt_i - Дужина временског интервала

Q_i - Доток воде

P_i - Потрошња воде

g_i - Губици воде



Слика 4.8.4.1 – Сумарне криве дотока и потрошње

Код акумулационих хидроелектрана за прорачун водног биланса користи се поступак са сумарном кривом. Сумарне криве дотицаја $\Sigma(Q_i \Delta t)$ и потрошње $\Sigma(P_i \Delta t)$ за разматрани период цртају се на истом цртежу. Разлика ордината две сумарне криве представља запремину акумулације па једначина биланса гласи:

$$V_i = \Sigma(Q_i \Delta t) - \Sigma(P_i \Delta t)$$

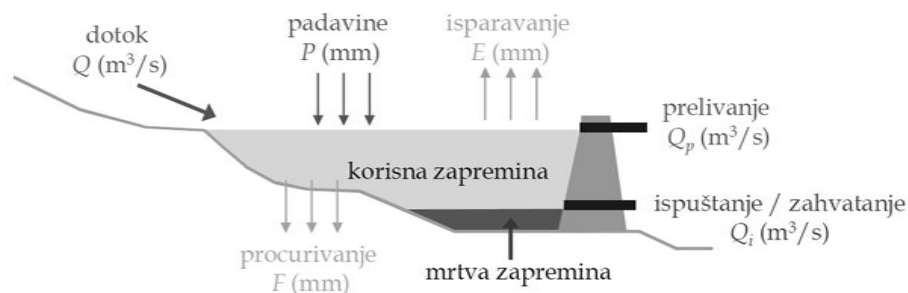
где је:

$\Sigma(Q_i \Delta t)$ – Ордината сумарне криве дотицаја у тренутку $t_i = i \Delta t$

$\Sigma(P_i \Delta t)$ – Ордината сумарне криве потрошње.

Овај поступак је примењен јер постоји унапред задата корисна запремина па треба уклопити истицање P_i за познати дотицај. Нагиб сумарне линије у изабраном тренутку времена једнак је протоку у том тренутку:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Sigma P_i dt) = P_i$$



Слика 4.8.4.2 – Биланс вода у акумулацији [17]

У овом поступку занемарени су губици услед испаравања са површине акумулационог језера и губици услед цурења језера. У каснијим фазама пројектовања и ови губици се узимају у обзир.

У тело бране се постављају два темељна испуста пречника 3.5 m са намером за контролисано испуштање вода при пражњењу акумулационог језера у низводни ток и за испирање наноса из акумулације. За испуштање вишка воде и за пропуштање поплавног таласа служи слободни прелив на круни бране.

4.9 Електротехнички део

4.9.1 Генератори

Генератори су спојени са хоризонталним двоструко регулисаним Каплановим турбинама преко еластичних спојница и мултипликатора одговарајућег преносног односа. Капланове турбине МХЕ Бресник на осовини вратила при називном паду и називном протоку (појединачном протоку) дају снаге од $P_{t1} = P_{t2} = P_{t3} = P_{t4} = 2058 \text{ kW}$. Узимајући у обзир ову вредност и податак о прописаном фактору снаге, $\cos(\phi) = 0,95$, податак о степену искоришћења генератора $\eta_g = 0,96$ и степену искоришћења мултипликатора $\eta_m = 0,98$ добија се да привидна снага једног генератора износи:

$$S_g = \frac{P_t \cdot \eta_g \cdot \eta_m}{\cos(\phi)} = \frac{2058 \cdot 0,96 \cdot 0,98}{0,95} = 2038 \cong 2040 \text{ kVA}$$

У табели 4.9.1.1 приказане су карактеристике једног синхроног генератора за вертикалну монтажу док је на слици 4.9.1.1 приказан изглед једног таквог генератора.

Табела 4.9.1.1 – Дванаестополни синхрони генератор за вертикалну монтажу

Називна снага генератора	2100kVA/1995kW
Називни напон генератора	6.3 kV
Називни фактор снаге	0.8 – 1
Називна струја генератора	248 A
Класа изолације	F
Називна учестаност	50 Hz
Степен корисног дејства	0.96
Број полова	2p=12
Називни број обртаја	500 min ⁻¹
Максималан број обртаја	700 min ⁻¹
Тип побуде	контактни, статички



Слика 4.9.1.1 – Генератор Капланове турбине [18]

4.9.2 Главни енергетски трансформатор и високонапонско постројење

Укупна снага генератора инсталираних у МХЕ Бресник износи 8400 kVA. Инсталисана снага главног енергетског трансформатора треба да буде већа од ове вредности.

Табела 4.9.2.1 - Карактеристике енергетског трансформатора

Номинална снага	10000 kVA
Однос трансформације	35±2.5%kV/6.3 kV
Спрега	YNd5
Номинална учестаност	50Hz
Тип унутршњег хлађења	уљни
Тип спољашњег хлађења	ваздушни
Начин хлађења	ONAF
Тип монтаже	Спољашњи

Високонапонско постројење МХЕ Бресник је класичног типа и прикључује се на 35kV-ну мрежу. Ово постројење садржи опрему и следећих је карактеристика:

- Енергетски трансформатор 35 kV
- Постојење 35 kV са једноструким сабирницама, изоловано ваздухом
- Енергетски трансформатор и постројење 35 kV су за спољњу монтажу
- Постојење 6.3 kV са једноструким сабирницама које је за унутрашњу монтажу
- Мерна група на вишем напону
- Високонапонско постројење је без посаде са даљинским управљањем



Слика 4.9.2.1 – Енергетски трансформатор 35 kV [19]

4.9.3 Турбинска регулација и регулација побуде

За МХЕ Бресник је предвиђено да ради у аутоматском режиму рада паралелно са електричном мрежом и у режиму регулације нивоа горње воде. Како би се задовољили ови захтеви и захтеви у погледу статичког и динамичког понашања МХЕ Бресник током њеног погона, системи турбинске регулације и системи регулације побуде у овој електрани морају задовољити одређене техничке критеријуме.

- Систем турбинске регулације

Овај систем обезбеђује:

- Аутоматски старт агрегата (отварање турбинских органа до предвиђене вредности, покретање турбине и регулацију броја обртаја у празном ходу);
- Регулацију броја обртаја односно учестаности, у острвском раду агрегата;
- Регулацију снаге односно протока (регулацију нивоа воде у акумулацији) у режиму параленог рада агрегата са мрежом;
- Аутоматско одвијање процеса заустављања у уобичајеним условима (номални стоп) када се примењује стандардно заустављање турбине и затварање спроводног апарата уз претходно растерећење агрегата;
- Аутоматско одвијање процеса заустављања у случају хаварије (квар агрегата, испад мреже итд.) када се примењује нагло заустављање турбине и затварање спроводног апарата без претходног растерећења агрегата;
- Пропорционално-интегрално-диференцијалну (ПИД) карактеристику регулације са широким опсегом подешавања параметара регулације;
- Систем турбинске регулације агрегата у МХЕ Бресник обавља своју функцију уз поштовање технолошког дијаграма турбине и генератора како не би дошло до напрезања опреме преко пројектованих односно номиналних вредности и евентуалне појаве кварова.

- Систем регулације побуде

Систем регулације побуде синхроних генератора чине систем побуде и регулатор напона. Систем побуде обезбеђује енергију односно једносмерну струју потребну за рад побуде синхроног генератора.

Регулатор напона обезбеђује, посредством система побуде, одржавање напона на сабирницама синхроног генератора, односно спољну напонско-реактивну карактеристику синхроног генератора, по унапред задатом програму.

Обезбеђује:

- Одржавање напона на сабирницама генератора са потребном тачношћу за различита оптерећења од празног хода до пуног оптерећења;
- Ограничење преоптерећења при опадању напона мреже;
- Заштиту генератора од превеликих оптерећења у случају кратких спојева у мрежи;
- Заштиту од превеликих напона при испаду оптерећења;
- Компензацију пада напона на спојном воду;
- Распделу реактивног оптерећења међу паралелно везаним генераторима.

Регулатори напона у саставу система регулације побуде треба да обезбеде пропорционално-интегралну карактеристику регулације са широким опсегом подешавања параметара регулације.

Системи регулације побуде у МХЕ Бресник обављају своје функције уз поштовање технолошког дијаграма генератора и турбине како не би дошло до

напрезања опреме преко пројектованих односно номиналних вредности и евентуалне појаве кварова.

4.9.4 Заштите

Обзиром на инсталисану снагу, МХЕ Бресник, тип агрегата, намену и предвиђени режим рада и остале захтеве, у електрани су предвиђене следеће заштите:

- Турбинске заштите
 - Заштита од превелике брзине (заштита од побега агрегата)
 - Термичка заштита лежајева турбине
 - Заштита од губитка притиска хидрауличног уља у систему турбинске регулације
- Заштите генератора G01, G02, G03 i G04
 - Диференцијална заштита генератора
 - Напонски зависна прекострујна заштита
 - Напонски зависна краткоспојна заштита генератора
 - 95 % земљоспојна заштита генератора
 - Заштита од губитка побуде
 - Заштита од повратне снаге (заштита од трајног моторног режима рада)
 - Заштита од инверзне компоненте струје
 - Термичка заштита лежајева и намотаја генератора
- Заштите главног енергетског трансформатора T06
 - Бухолц заштита
 - Контактни термометар
 - Диференцијална заштита трансформатора
 - Нулта диференцијална заштита трансформатора
- Остале заштите у машинској згради
 - Заштита од губитака напајања сопствене потрошње
 - Заштита од губитка сигурног једносмерног напона
 - Заштита од губитка сигурног наизменичног напона
 - Заштита од потапања
 - Заштита од недозвољеног уласка у просторије

- Противпожарна заштита
 - Системске заштите
- Поднапонска
- Пренапонска
- Подфреквентна
- Надфреквентна
 - Заштите спојног вода
- Прекострујна
- Краткоспојна
- Земљоспојна заштита вода
- Дистантна заштита
 - Заштите бране
- Заштита од губитка притиска у систему хидрауличног уља под притиском на брани

5. Економска анализа

5.1 Инвестициони трошкови

Да би пројекат малих хидроелектрана био економски исплатив потребно је пре свега свести све инвестиционе трошкове који су заправо и највећи трошкови па тек онда експлатационе трошкове, нето годишњу зараду и на крају време повратка инвестиције односно профитабилност пројекта. Највећи инвестициони трошкови су заправо трошкови грађевинских и хидрограђевинских радова и они су приказани у табели 5.1.1. У ове трошкове спадају бетонска брана са рибљом стазом, машинска зграда са одводним каналом, заштита приобаља, регулација речног тока у околини бране, парцијално преграђивање реке и припрема градилишта и остали грађевински и хидрограђевински радови.

Табела 5.1.1 – Предрачун грађевинских и хидрограђевинских радова

Редни број	Назив	Цена €
1.	Бетонска брана са рибљом стазом	1800000
2.	Машинска зграда са одводним каналом	500000
3.	Регулација речног тока у околини бране	480000
4.	Заштита приобаља	150000
5.	Парцијално преграђивање реке и припрема градилишта	400000
6.	Остала грађевинска и хидрограђевинска инфраструктура	500000
7.	Непредвиђени трошкови (10%)	380000
Укупно		4200000

Инвестициони трошкови који су веома значајни су трошкови који се тичу машинске и хидромашинске опреме и приказани су у табели 5.1.2. У ове трошкове спадају Капланова турбина са кућиштем, турбински регулатор, хидромашинска опрема у машинској згради, хидромашинска опрема на брани и остали помоћни системи.

Табела 5.1.2 – Предрачун машинске и и хидромашинске опреме

Редни број	Назив	Ком	Цена €	Укупна цена €
1.	Капланова турбина са кућиштем	4	320000	1280000
2.	Турбински регулатор	4	60000	240000
3.	Хидромашинска опрема у машинској згради	/	/	650000
4.	Хидромашинска опрема на брани	/	/	300000
5.	Помоћни системи и хидромашинска опрема	/	/	350000
6.	Транспорт, монтажа и испитивање (11%)	/	/	340000
7.	Непредвиђени трошкови (3%)	/	/	100000
Укупно				3260000

Комплексна електро опрема је врло скупа па је то такође велики инвестициони трошак који се узима у обзир и приказан је у табели 5.1.3. У ове трошкове спадају генератор, енергетски трансформатор, опрема генераторског напона и средњенапонске опреме, прикључни вод, опрема у трафо станици, трошкови прикључења система на мрежу као и транспорт и монтажа.

Табела 5.1.3 – Предрачун електро опреме

Редни број	Назив	Ком	Цена €	Укупна цена €
1.	Генератор са системом статичке побуде	4	280000	1120000
2.	Енергетски трансформатор	1	130000	130000
3.	Опрема генераторског напона	/	/	700000
4.	Средњенапонска опрема	/	/	800000
5.	Прикључни ваздушни вод 35kV, 1 km	/	/	50000
6.	Електро опрема у прикључној ТС	/	/	80000
7.	Трошкови прикључења на мрежу	/	/	760000
8.	Транспорт и монтажа (10%)	/	/	350000
9.	Непредвиђени трошкови (4%)	/	/	160000
Укупно				4150000

У табели 5.1.4 приказана је збирна рекапитулација трошкова грађевинских и хидрограђевинских радова, машинске и хидромашинске опреме као и електро опреме. У збирну рекапитулацију инвестиционих трошкова спадају и трошкови самог пројектовања, менаџмента и других, у односу на прве, мањих трошкова.

Табела 5.1.4 – Збирна рекапитулација трошкова

Назив	Цена €
Грађевински и хидрограђевински радови	4200000
Машинска и хидромашинска опрема	3260000
Електро опрема	4150000
Пројектовање, менаџмент и остали трошкови	70000
Укупно	11680000

Укупни инвестициони трошкови изградње МХЕ Бресник износе 11.680.000,00 €. Средња јединична цена МХЕ Бресник износи 1508 € по инсталисаном kW.

5.2 Трошкови инвестиционог и текућег одржавања

Трошкови инвестиционог и текућег одржавања обухватају средства која се морају издвојити на годишњем нивоу за одржавање комплетног објекта, односно МХЕ Бресник. Приказани су у табели 5.2.1.

Табела 5.2.1 – Трошкови инвестиционог и текућег одржавања МХЕ Бресник на годишњем нивоу

Редни број	Назив	Текуће и инвестиционо одржавање (%)	Укупно €
1.	Бетонска брана са рибљом стазом	1.00	18000
2.	Машинска зграда са одводним каналом	0.50	2500
3.	Регулација речног тока у околини бране	1.00	4800
4.	Заштита приобаља	0.75	1125
5.	Турбине са регулаторима	0.50	7600
6.	Хидромашинска опрема	1.00	9500
7.	Помоћни системи и хидромашинска опрема	0.50	1750
8.	Генератори са побудним системима	1.25	14000
9.	Енергетски трансформатор	1.00	1300
10.	Опрема генераторског напона	1.50	10500
11.	Средњенапонска опрема	1.75	14000
12.	Прикључни вод	1.25	1625
13.	Прикључење на мрежу	1.5	11400
Укупно			80100

Погонски трошкови, односно трошкови материјала, делова и услуга који се односе на пуштање МХЕ у рад и контролисање мерне опреме при пуштању се обично израчунавају као 1% од вредности електро опреме, што износи око **41500 €**.

5.3 Трошкови на зараде и накнаде запослених

Експлатациони трошкови који се тичу зараде и накнаде запослених у малој хидроелектрани на годишњем нивоу приказани су у табели 5.3.1.

Табела 5.3.1 - Трошкови на зараде и накнаде запослених на годишњем нивоу

Редни број	Степен стручне спреме	Број радника	Бруто доходак €	Време ангажовања у току године	Укупно €
1.	Висока стручна спрема	2	1000	12	24000
2.	Средња стручна спрема	3	650	12	23400
3.	Квалификовани радник	5	500	12	30000
Укупно					77400

Осим ових трошкова неопходно је издвојити и одређена новчана средства за законске обавезе односно порез, чија висина износи 27% од укупне бруто плате радника и то износи **20898 €**.

5.4 Трошкови осигурања

Објекте и опрему МХЕ неопходно је осигурати од лома или пожара. Стопа осигурања варира зависно од осигуравајућег друштва. Стопе осигурања приказане у табели 5.4.1 представљају просечне стопе осигурања које важе на територији Републике Србије.

Табела 5.4.1 – Трошкови осигурања МХЕ Бресник

Редни број	Назив	Стопа осигурања		Укупно €
		Пожар %	Лом %	
1.	Бетонска брана са рибљом стазом	0.00	0.40	7200
2.	Машинска зграда са одводним каналом	0.50	0.40	4500
3.	Регулација речног тока у околини бране	0.00	0.40	1920
4.	Заштита приобаља	0.00	0.50	750
5.	Турбине са регулаторима	0.10	0.20	4560
6.	Хидромашинска опрема	0.00	0.50	4750
7.	Помоћни системи и хидромашинска опрема	0.10	0.40	1750
8.	Генератори са побудним системима	0.50	0.20	7800
9.	Енергетски трансформатор	0.40	0.20	780
10.	Опрема генераторског напона	0.40	0.25	4550
11.	Средњенапонска опрема	0.40	0.25	5200
12.	Прикључни вод	0.50	0.20	910
13.	Прикључење на мрежу	0.40	0.30	5320
Укупно				49990

5.5 Трошкови амортизације

Трошкови амортизације су директно повезани са технолошким радним веком објеката и опреме и приказани су у табели 5.5.1. Технолошки радни век у случају МХЕ Бресник износи 50 година за грађевинске објекте и 20 година за опрему, осим за енергетски трансформатор за који износи 25 година. За прорачун трошкова амортизације у случају МХЕ Бресник примењена је и линеарна стопа амортизације.

Табела 5.5.1 – Трошкови амортизације МХЕ Бресник на годишњем нивоу

Редни број	Назив	Амортизација [%]	Укупно €
1.	Бетонска брана са рибљом стазом	2.00	36000
2.	Машинска зграда са одводним каналом	2.00	10000
3.	Регулација речног тока у околини бране	2.00	9600
4.	Заштита приобаља	2.00	3000
5.	Турбине са регулаторима	2.00	30400
6.	Хидромашинска опрема	2.00	19000
7.	Помоћни системи и хидромашинска опрема	2.00	7000
8.	Генератори са побудним системима	5.00	56000
9.	Енергетски трансформатор	4.00	5200
10.	Опрема генераторског напона	5.00	35000
11.	Средњенапонска опрема	5.00	40000
12.	Прикључни вод	5.00	42000
13.	Прикључење на мрежу	5.00	38000
Укупно			285200

Тренутна продајна цена електричне енергије је 57.55 €/MWh. Просечна производња електричне енергије је 33613 MWh годишње што значи да би укупан бруто приход од продаје електричне енергије на годишњем нивоу био 1934428 €.

Трошкови лизинга, односно најма земљишта на коме се налази МХЕ Бресник је 1.52% годишњих прихода МХЕ од генерисане електричне енергије, што износи **29403 €**.

5.6 Укупни годишњи трошкови

У табели 5.6.1 приказана је збирна рекапитулација свих оперативних годишњих трошкова. Ту дакле спадају трошкови инвестиционог и текућег одржавања, погонски трошкови, трошкови на зараде и накнаде, трошкови осигурања, трошкови лизинга и амортизације.

Табела 5.6.1 – Укупни годишњи расходи

Назив	Укупно €
Трошкови инвестиционог и текућег одржавања	80100
Погонски трошкови односно трошкови материјала	41500
Трошкови на зараде и накнаде запослених	77400
Законске обавезе односно порез на зараде	20898
Трошкови осигурања	49990
Трошкови амортизације	285200
Трошкови лизинга	29403
Укупно	584491

5.7 Профитабилност пројекта

Просто време повраћаја инвестиције приказано је у табели 5.7.1. Прво се од бруто годињих прихода производње електричне енергије одузму укупни годишњи оперативни трошкови, затим се од добијене нето годишње зараде одузме део новца за опорезивање и добија се укупни нето приход. Нето годишњим приходом је потребно поделити суму укупних инвестиционих трошкова како би се добило просто време повраћаја инвестиције.

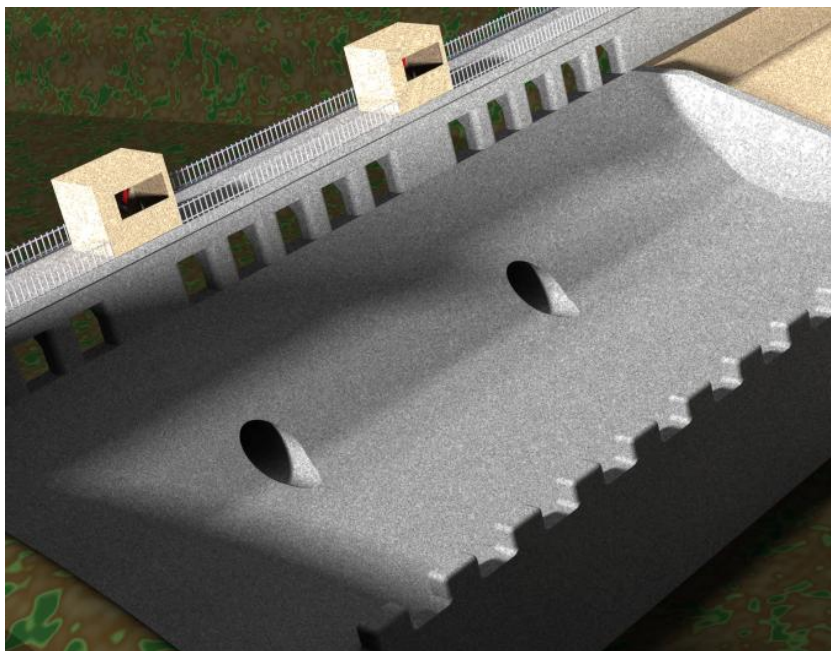
Табела 5.7.1 – Профитабилност пројекта и време повратка инвестиције

Укупна инвестиција	11680000 €
Бруто годишњи приход	1934428 €
Укупни трошкови	584491 €
Нето приход без пореза	1349937 €
Порез од 16% на нето добит	215989 €
Укупни нето приход са порезом	1133947 €
Просто време повраћаја инвестиције	10 година и 4 месеца

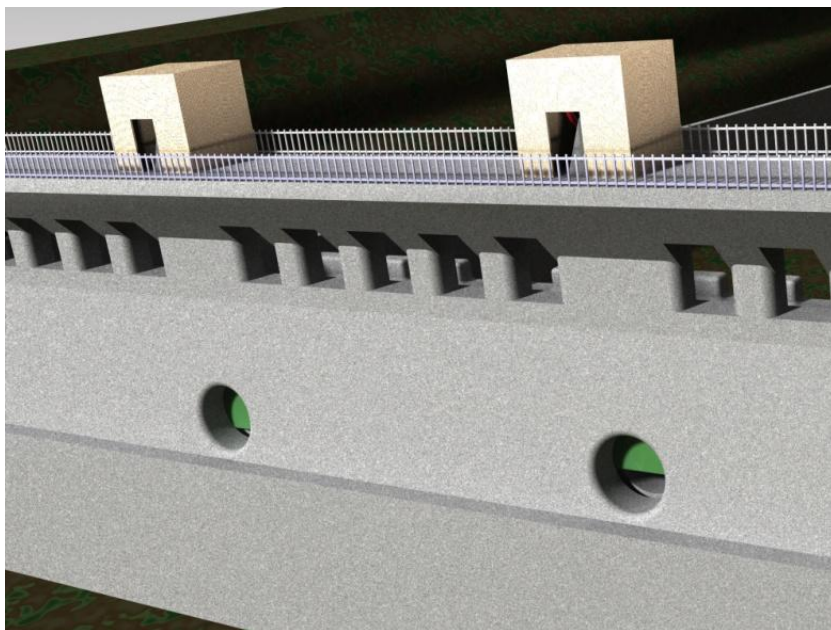
Израда акционог плана траје од две до три године, па се први зарађени новац очекује две до три године од тренутка почетног улагања. Зато ће се просто време повраћаја инвестиције очекивати за око 13 година.

6.0 Моделирање МХЕ Бресник

На слици 6.1 и 6.2 приказан је преливни део бране са предње и задње стране, респективно. У овом делу бране налазе се два темељна испуста пречника 3.2m сваки и који у периоду великих вода могу да пропусте до $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Ширина слободног прелива на овом делу бране је 60m а висина бране је 9m не рачунајући сам темељ укопавања бране од 4m.

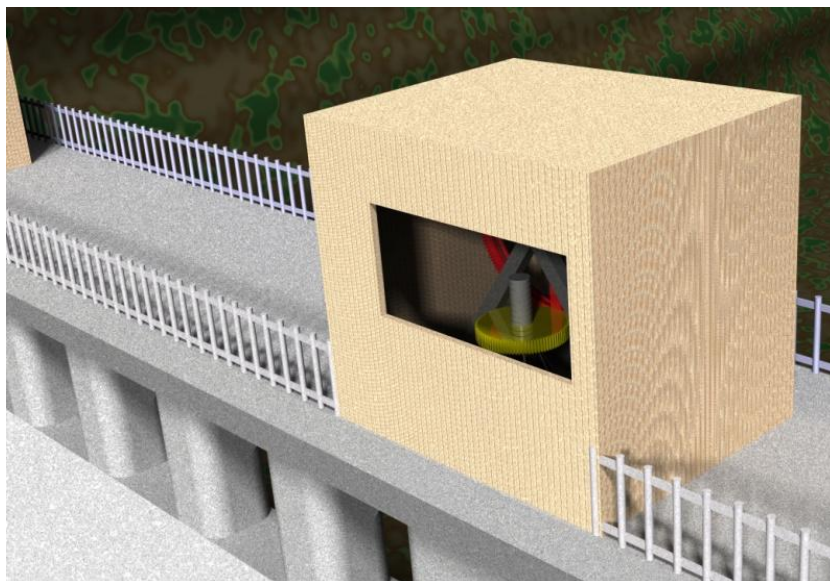


Слика 6.1 – Преливни део бране са предње стране



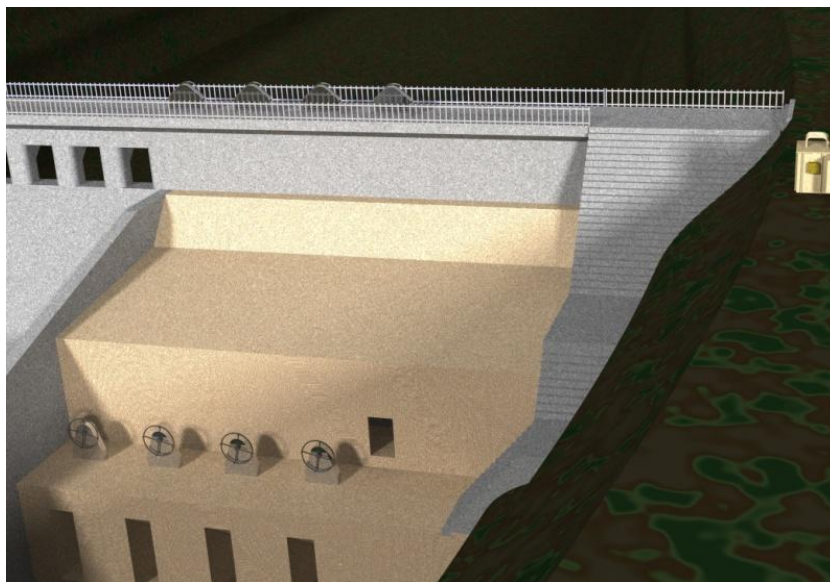
Слика 6.2 – Преливни део бране са задње стране

Систем вентила за затварање испусних канала је приказан на слици 6.3. Овај систем је аутоматски и при великим водама се укључује и отвара испусте. У случају заказивања система испусти се могу регулисати и ручно.



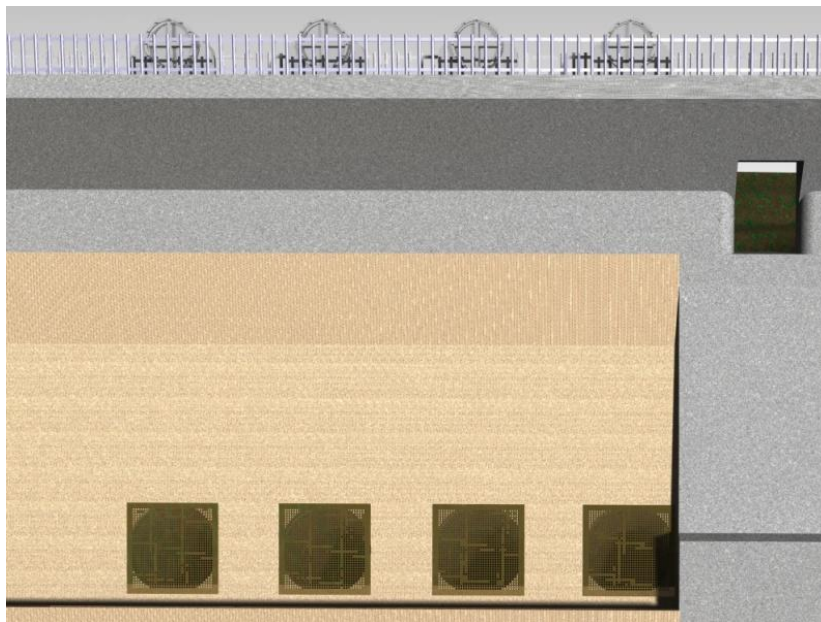
Слика 6.3 – Систем вентила за затварање испусних канала

На слици 6.4 приказан је непреливни део бране у коме се налази машинска зграда површине око 350m^2 . На непреливном делу бране налазе се системи за затварање односно отварање за доток воде до сваке турбине посебно као и систем за затварање односно отварање на дифузору.



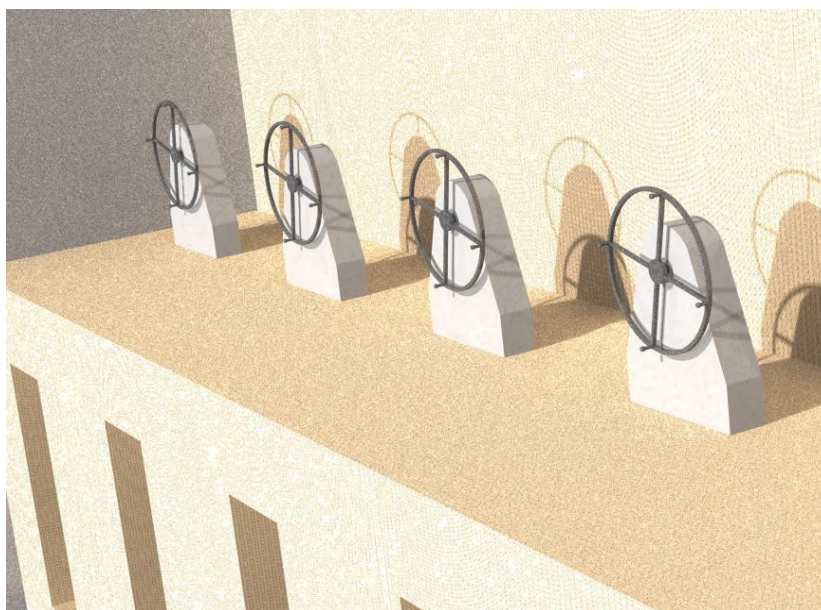
Слика 6.4 – Непреливни део бране са машинском зградом

На слици 6.5 приказан непреливни део бране са задње стране односно стране са које се вода доводи из реке у турбине. Пре уласка воде у цеви које воде до турбине постављене су грубе решетке које не дозвољавају већим рибама и нежељеним предметима да доспеју до турбине и тако избегну већа оштећења и хаварије. У горњем делу слике су приказани механизми за затварање довода воде сваке турбине посебно.



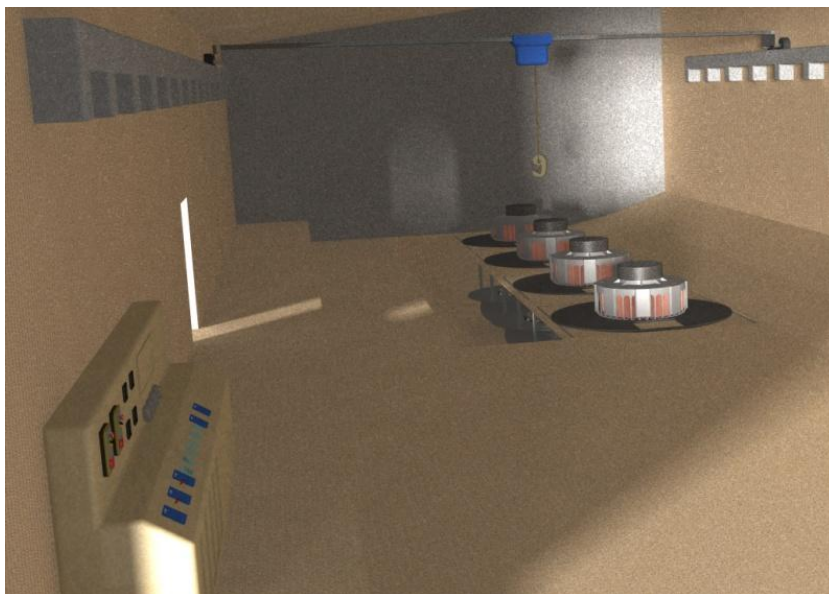
Слика 6.5 – Решетке са 4 цеви за довод воде до турбина и систем за затварање сваке турбине посебно

У случају ремонта или прегледа турбина, поред затварања довода воде потребно је и затворити дифузоре како се вода не би враћала и представљала проблем при раду. Зато се и код дифузора постављају системи за затварање као на слици 6.6 који су ручни и лако се затварају.



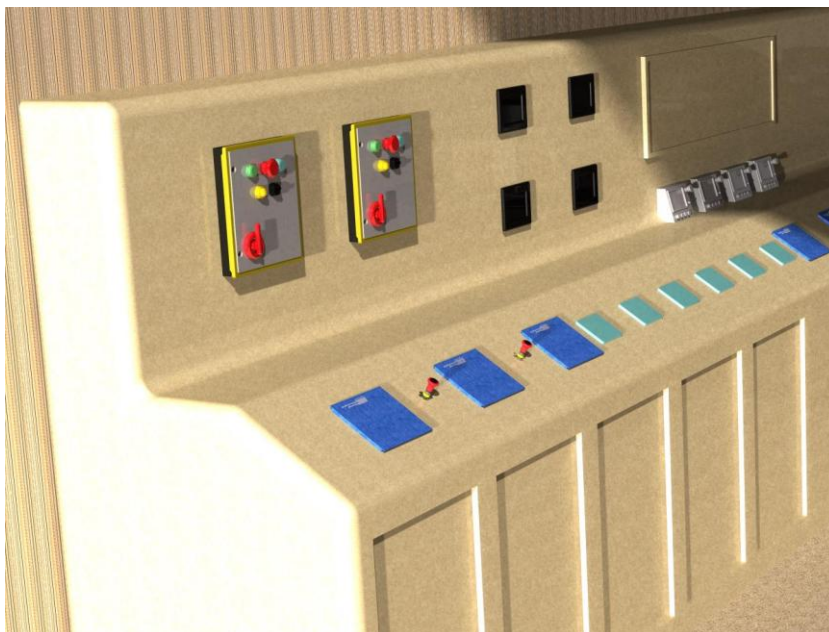
Слика 6.6 – Вентили за затварање дифузора

У самој машинској згради као на слици 6.7 налазе се четири турбине које су спрегнуте са генераторима, мосна дизалица која се користи при ремонту и наравно командна табла са које се све прати и већина ствари регулише. Поред ове ту је и остала опрема потребна за нормалан рад у машинској згради.



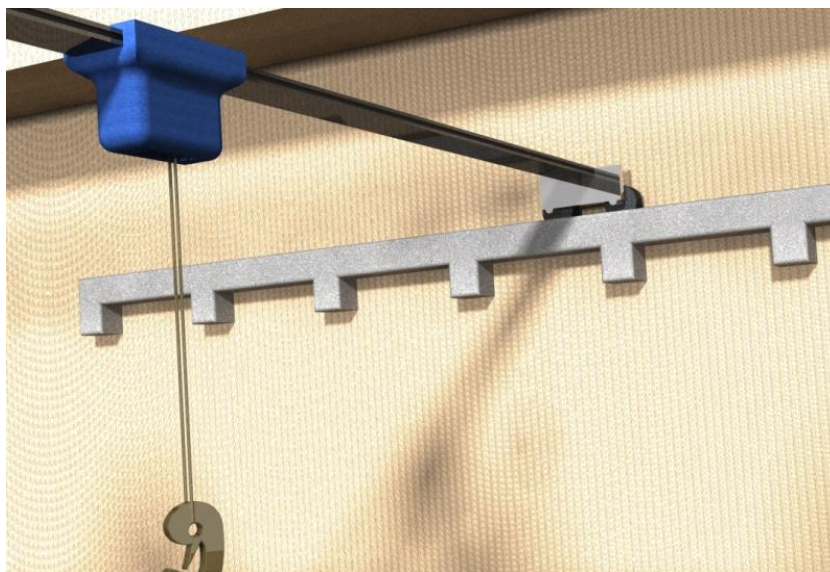
Слика 6.7 – Машинска зграда са унутрашње стране

Командна табла је важан део машинске зграде и уопште целог постројења мале хидроелектране. То је практично мозак постројења који прати све операције везане за хидроелектрану, од мерења протока и висине воде до количине добијене електричне енергије из генератора. Приказан је на слици 6.8.



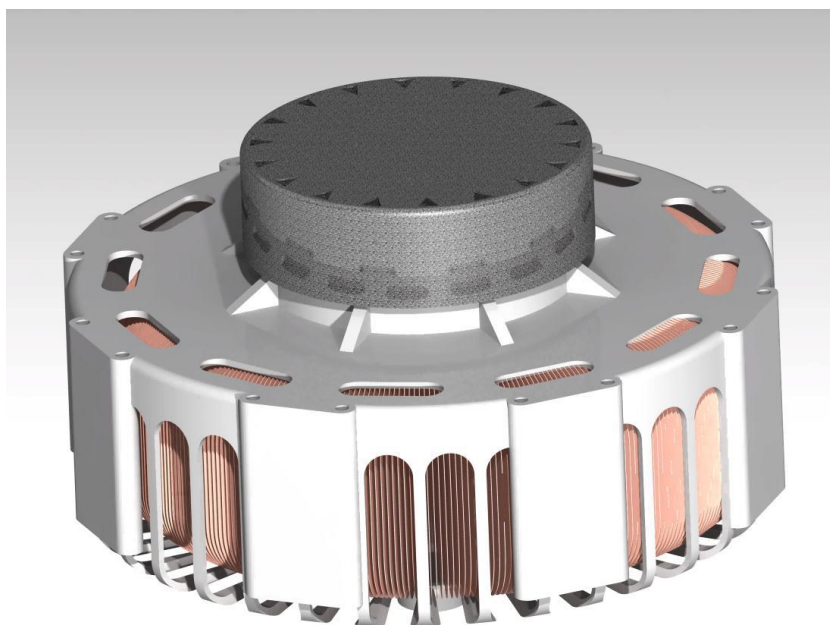
Слика 6.8 – Командна табла

На слици 6.9 приказана је мосна дизалица која је монтирана у машинској згради и служи за манипулацију елементима при монтажи, демонтажи и ремонту. Овакве дизалице постављају се пре свега због агрегата који имају велике масе од неколико тона.



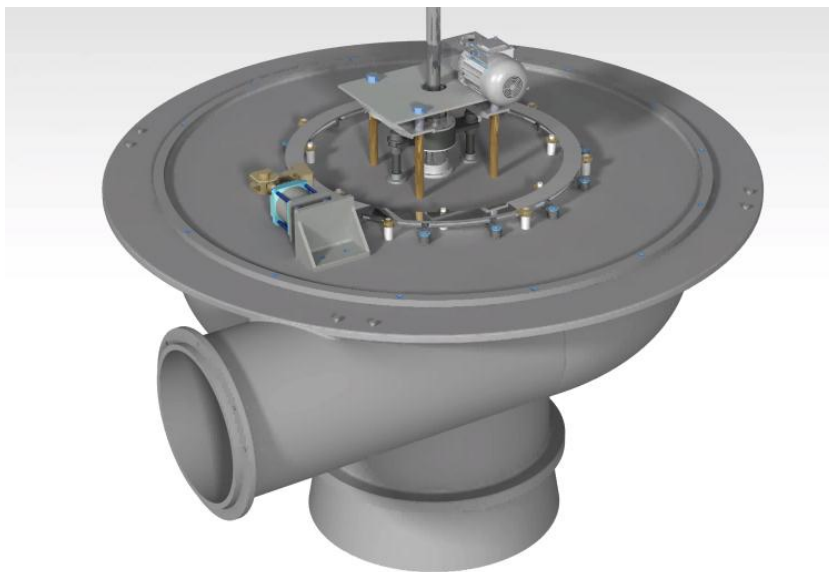
Слика 6.9 – Мосна дизалица

На слици 6.10 приказан је генератор који се користи у овој малој хидроелектрани. Снага оваког једног генератора износи 2040kVA/1995kW. Називни напон му је 6.3 kV, називна струја 248A, учестаност 50Hz, називни број обртаја 500 min^{-1} а максимални број обртаја је 700 min^{-1} .



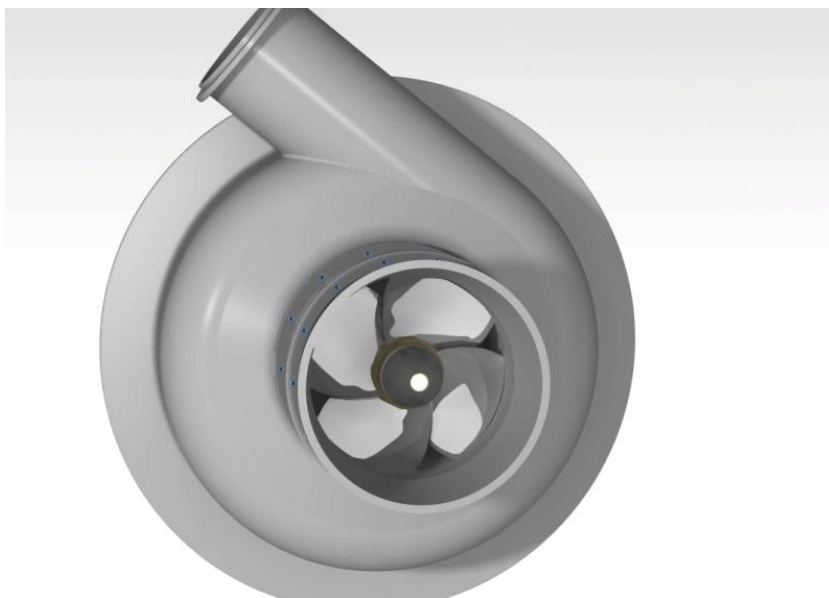
Слика 6.10 – Генератор

На слици 6.11 је приказана Капланова турбина која има радно коло са четири лопатице које су закретне и могу се закретати у погону како би се смањили губици и осигурало струјање воде са најмање хидрауличких губитака. Овакав систем је сложенији али је степен искоришћења знатно већи него код обичних радних кола.



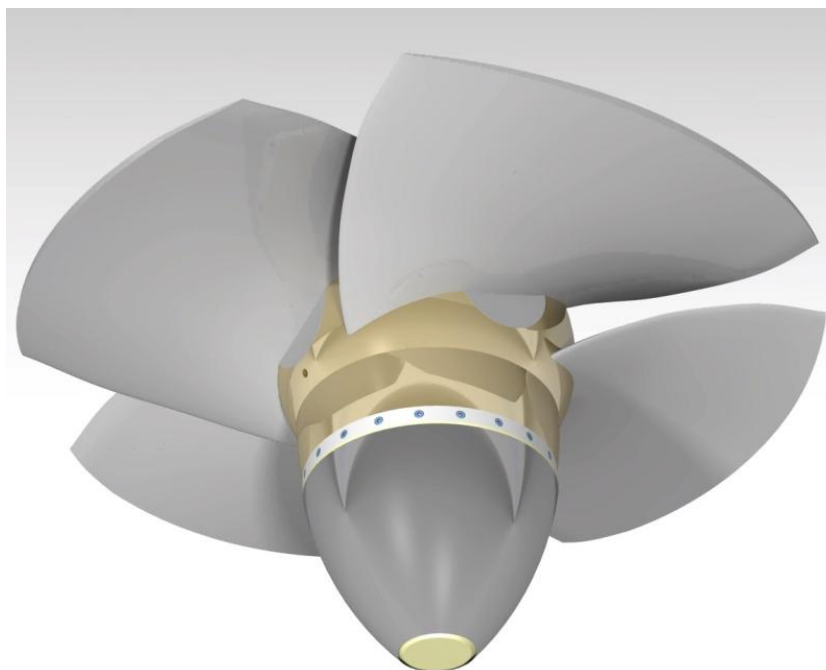
Слика 6.11 – Капланова турбина

У кућиште турбине се смештају радно коло турбине као и спроводне лопатице које имају улогу да регулишу проток али и да правилно усмере струју воде према роторским лопатицама турбине. Двоструком регулацијом осигурава се висока корисност у широком радном подручју. На слици 6.12 приказано је кућиште Капланове турбине.



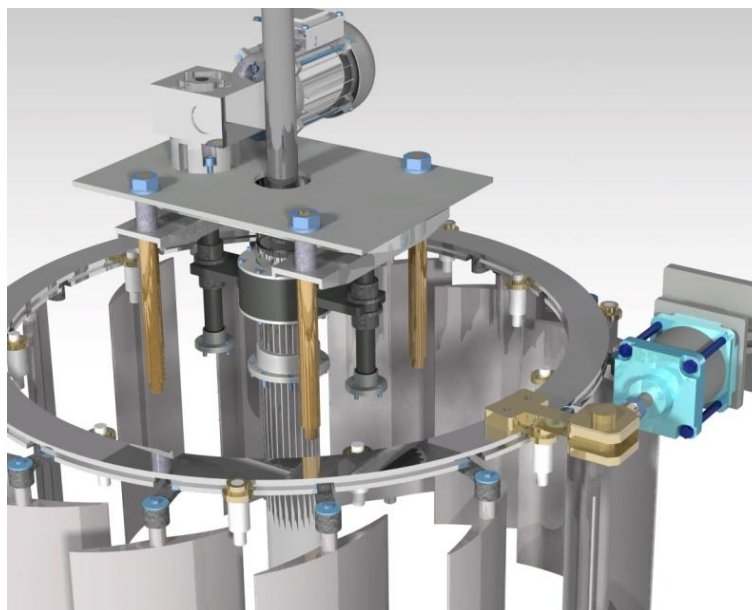
Слика 6.12 – Кућиште турбине

На слици 6.13 је приказано радно коло Капланове турбине које садржи четири покретне лопатице које су учвршћене на ротирајуће вратило. Угао закретања лопатица ротора одређује се према отвору помоћног кола и тренутном паду. Појединачна инсталисана снага турбина је 2058кW.



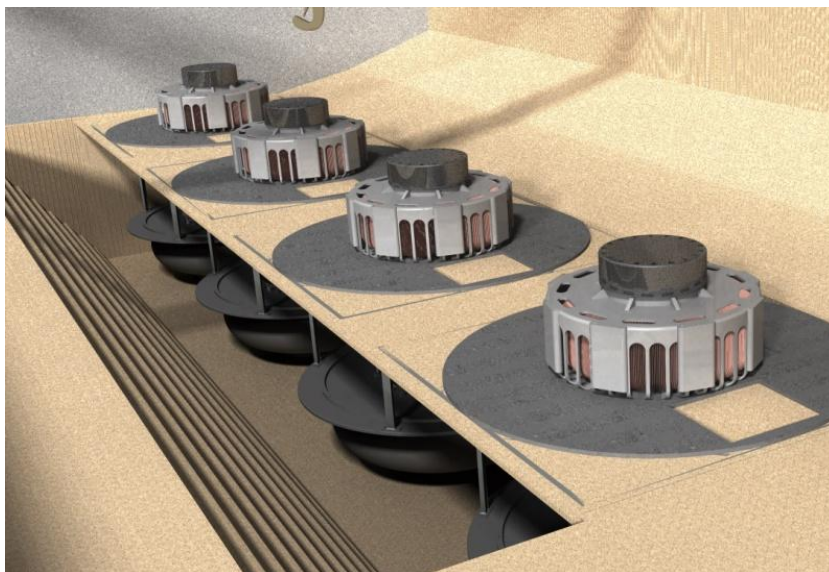
Слика 6.13 – Радно коло Капланове турбине

На слици 6.14 су приказани механизми за затварање спроводних и роторских лопатица. Однос отвора лопатица помоћног и радног кола код оваквих турбина регулише се преко посебног уређаја који се назива кулиса. Спроводних лопатица има обично од 20 до 32.



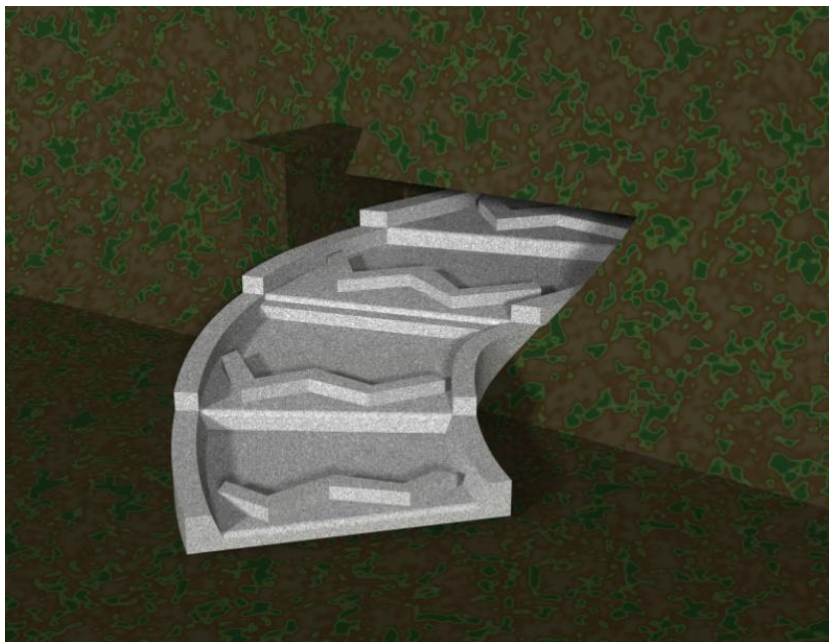
Слика 6.14 – Механизам окретања усмеривачких и роторских лопатица

На слици 6.15 приказана је спрега турбина са генератором. Они су спојени преко еластичних спојница и мултипликатора преносног односа 1:2. Степен искоришћења мултипликатора је 98%.



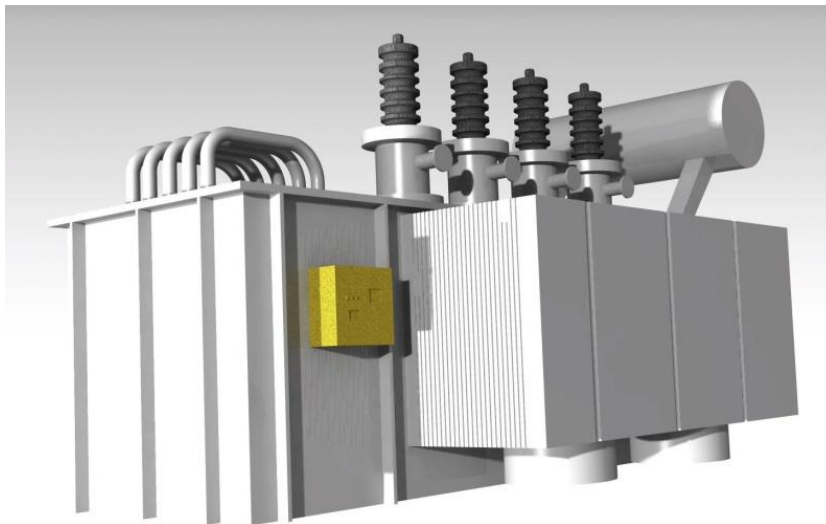
Слика 6.15 – Спрега Капланове турбине и генератора

Што се тиче рибље стазе она се налази низводно од бране и пре свега служи да би се рибе кретале узводно јер се низводно крећу преливањем воде преко круне бране и приказана је на слици 6.16. Систем је такав да је рибља стаза у такозваним слаповима и преградама које служе за одмарање риба и први део стазе се налази у тунелу у земљи док се наставак стазе налази уз саму обалу реке. Поред ове стазе предвиђени су још неки начини за пролаз риба.



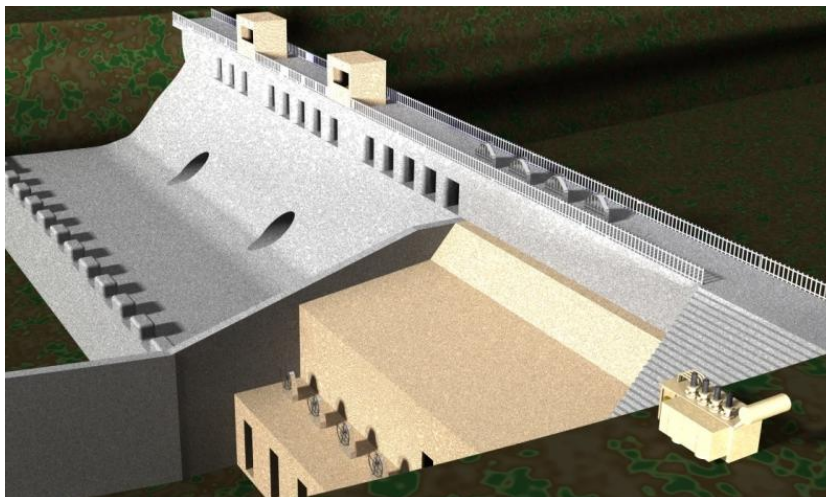
Слика 6.16 – Стаза за пролаз риба

На слици 6.17 је приказан енергетски трансформатор номиналне снаге 10000кVA. Снага трансформатора је добијена као следећа већа усвојена вредност укупне снаге свих инсталисаних генератора. Номинална учестаност му је 50Hz, тип унутрашњег хлађења је уљни док је спољашње хлађење ваздушно. Монтира се са спољње стране недалеко од машинске зграде.



Слика 6.17 – Трансформатор

На слици 6.18 је приказано цело постројење мале хидроелектране. Непреливни део бране са машинском зградом као и енергетски трансформатор се налазе на левој страни реке. Вода која истиче из турбина се нешто касније меша са водом која прелива преко преливног дела бране. Разлог томе је што постоји преграда између њих која се поставља због разлике висине.



Слика 6.18 – Цело постројење МХЕ Бресник

Закључак

Основна идеја овог мастер рада била је да се покаже колика је могућност искоришћења малих хидроелектрана као облик обновљивог извора енергије у Србији и тиме још више подигне свест, заинтересованост и олакша пут за реализацију оваквог једног пројекта. Изградњом оваквих малих хидроелектрана доприноси се одрживом развоју друштва јер је економски изводљив, еколошки прихватљив и обезбеђује децентрализовану производњу и развој региона у којем се гради. Самим тим повећава се и запосленост становништва тог региона како у фази изградње тако и у току њене експлоатације. Рад малих хидроелектрана је поуздан и имају дуг животни век без значајних захвата осим редовног одржавања опреме.

Литература

- [1] Dušan Gordić, *Priručnik za seminar o energetskej efikasnosti*, Kragujevac, 1. Decembar 2010.
- [2] http://www.fimmanager.edu.rs/site/pdf/CD-Zbornik-web/pdf/2_MenadzmentUIndustriji/Markovic.pdf
- [3] <http://www.ekosrbija.org/tekstovi/srbija-pred-ozbiljnim-nestasicama-energije.html>
- [4] <http://sr.wikipedia.org/wiki/хидроенергија>
- [5] http://www.weltce.com.br/english/disco_virtual/image009_2.jpg
- [6] *Small scale hydro power*, Papers presented at the Sixteenth Consultative Council meeting of the Watt Committee on Energy, London, 5 June 1984
- [7] Гордић Душан: *Обновљиви извори енергије 2 – мале хидроелектране*, скрипта, Машински факултет Крагујевац, Крагујевац, 2010.
- [8] <http://www.opg.com/power/images/hydrohow.jpg>
- [9] http://www.hk-phy.org/energy/alternate/hydro_phy/images/pump_storage.gif
- [10] <http://bantrel.com/markets/popups/images/Hydroelectric.png>
- [11] <http://sh.wikipedia.org/wiki/Ibar>
- [12] http://sh.wikipedia.org/wiki/Datoteka:L%27Ibar_%C3%A0_Mataru%C5%A1ka_Banja.jpg
- [13] P. Novak, A. Moffat, C. Nalluri and R. Narayanan, *Hydraulic Structures*, 2004.
- [14] http://hr.wikipedia.org/wiki/Kaplanova_turbina
- [15] <http://www.hidroenergia.com.br/us/index.php?i=adequacao>
- [16] <http://www.renewbl.com/2010/07/09/alstom-supplying-three-hydropower-generators-to-ontario-power-generation.html>
- [17] http://hikom.grf.bg.ac.rs/web_stranice/KatZaHidr/Predmeti/InzHidrol/predavanja2011/2011_02_bilans.pdf
- [18] <http://www.turnkeybase.com.tw/PTTGUS.htm>
- [19] <http://www.power-transformer.net/35kv-sz11-oil-rectifier-transformer/>
 Lazar Lazarević, *Elektrane i razvodna postrojenja*, peto dopunjeno izdanje, Tehnička knjiga, Beograd, 1969.
<http://www.ssl-link.com/mre/cms/mestoZaUploadFajlove/KatastarMHEsrbija.pdf>
<http://www.cqm.rs/2009/pdf/4/07.pdf>
http://www.globalelectricity.org/projects/fiji/Micro-Hydro_fichiers/4-3-1%20Design.pdf
<http://www.tlfzfm.com/en/>
<http://oie.mingorp.hr/UserDocsImages/Male%20HE%20prezentacija.pdf>
http://www.etfos.hr/upload/OBAVIJESTI/obavijesti_strucni/EiEES_2009_10_2_poglavlje_02-03-2010.pdf
<http://ekoiko.com>
<http://www.hidmet.gov.rs/>
<http://www.sepa.gov.rs/>
<http://www.seminarskirad.biz/seminarski/lazar%20lazarevic%20-%20elektrane%20i%20razvodna%20postrojenja.pdf>
http://www.tehnicka-apatin.edu.rs/attachments/171_Stanje%20i%20razvoj%20MHE%20u%20Srbiji.pdf
https://docs.google.com/gview?url=http://www.tehnicka-apatin.edu.rs/attachments/171_Stanje+i+razvoj+MHE+u+Srbiji.pdf&chrome=true
<http://www.deutsches-museum.de/en/collections/machines/power-engines/water-turbines/distributor-and-runner-of-a-kaplan-turbine-1952/>